

de lo EXTRAORDINARIO

La génesis del Universo

VOLUMEN II

DEBATE
ediciones delPrado

ATLAS DE LO EXTRAORDINARIO

LA GÉNESIS DEL UNIVERSO

Volumen II

ATLAS DE LO EXTRAORDINARIO

LA GÉNESIS DEL UNIVERSO

Volumen II



Dirección editorial de la serie:
Juan María Martínez
Ángel Lucía

Coordinación editorial de la serie:
Juan Ramón Azaola
Carlos Ponce

Dirección técnica de la serie:
Eduardo Peñalba

Edición: Luis G. Martín, Íñigo Castro, Lourdes Lucía,
Colin A. Ronan
Fotografía y documentación gráfica: José María Sáenz
Almeida, Marta Carranza, Juan García y Nano Cañas
Diseño: John Bigg, Jonathan Bigg y Zilda Tandy
Producción: Barry Baker, Janice Storr y Rosanna Scott
Colaboraciones: Iain Nicholson, Andy Lawrence y
Antonio García-Olivares
Versión castellana: Gian Castelli

Título original: *The Natural History of the Universe*

ISBN: 84-7838-247-X Volumen II
Impreso en el mes de mayo de 1994
Depósito legal: M -11.164-1993

IMPRESION
GRÁFICAS ALMUDENA

Foto de cubierta: Cuerpos celestes, fotografía
de Patrick Eden, the Image Bank

Sumario

Volumen II

EL GRAN DISEÑO

Nuestro sistema solar 106

Mercurio 108

Venus 110

La Tierra 114

Marte 116

Júpiter 120

Saturno 124

Urano 128

Neptuno y Plutón 130

Satélites 134

Asteroides 142

Cometas 144

Meteoritos 146

EL UNIVERSO VIVIENTE 148

El planeta hogar 150

La naturaleza de la vida 154

La química de la vida 156

El comienzo de la vida 158

Las moléculas de la vida 160

El dominio del planeta 162

La comunicacion universal 166

El futuro del universo 168

Dimensiones ocultas 172

El espacio cuántico 176

Ciertas dudas en torno al Big Bang 178

El principio antrópico 180

La creación del universo 184

Las primeras y últimas cosas 186

Mapas estelares 188

Glosario 192

Biografías 204

Índice onomástico y de materias 206

Agradecimientos 212

NUESTRO SISTEMA SOLAR

La familia del Sol

Las órbitas de todos los planetas principales muestran características que resultarían lógicas según la teoría de la acreción a partir de una nebulosa solar en forma de disco (págs. 102-103). Todas las órbitas se hallan situadas en el mismo plano. No obstante, hay excepciones. Venus, por ejemplo, muestra una inclinación de 3,4 grados, y la de Mercurio —el planeta más cercano al Sol— es de 7 grados. La inclinación del resto de los planetas es inferior, a excepción de Plutón —el planeta más alejado del Sol—, que muestra una inclinación de algo más de 17 grados.

Este hecho lleva a los astrónomos a considerar que Plutón no es en realidad uno de los planetas principales (pág. 133) pues, salvo él, las órbitas de los principales cuerpos astrales del sistema solar recorren prácticamente un plano común.

No puede decirse lo mismo de los asteroides, los cometas y sus meteoritos. En concreto, la inclinación de las órbitas de los cometas varía considerablemente. Algunos se hallan tan inclinados que giran alrededor del Sol con un movimiento retrógrado; en otras palabras, se desplazan hacia atrás con respecto a los planetas principales y los asteroides. El cometa Halley constituye un buen ejemplo, dado que su inclinación alcanza los 162 grados.

La segunda característica de las órbitas de los planetas principales es que todas ellas son estables y aproximadamente circulares. Una vez más, hallamos excepciones a esta regla. Mercurio, por ejemplo, posee una órbita que describe una pronunciada elipse dotada de una excentricidad de 0,206, esto es, cinco veces más que la excentricidad elíptica media del resto de los planetas principales.

Una tercera característica es el hecho comprobado de que todos los planetas principales describen sus órbitas solares en un mismo sentido, esto es, contrariamente a las agujas del reloj si los contemplamos desde arriba. Ello indica que su formación tuvo lugar en una nebulosa solar rotatoria.

Resulta útil dividir los planetas principales en dos grupos. Los más cercanos al Sol se denominan planetas telúricos. Entre ellos, se cuentan Mercurio, Venus, la Tierra y Marte. El segundo grupo comprende a los llamados gigantes gaseosos, Júpiter, Saturno, Urano y Neptuno.

Todos los gigantes gaseosos poseen núcleos sólidos rodeados por inmensas atmósferas frías en las que abundan el metano, el amoníaco, el helio y el hidrógeno. Estos gases ligeros se hallaban asimismo presentes al principio en los planetas telúricos, pero escaparon al espacio.

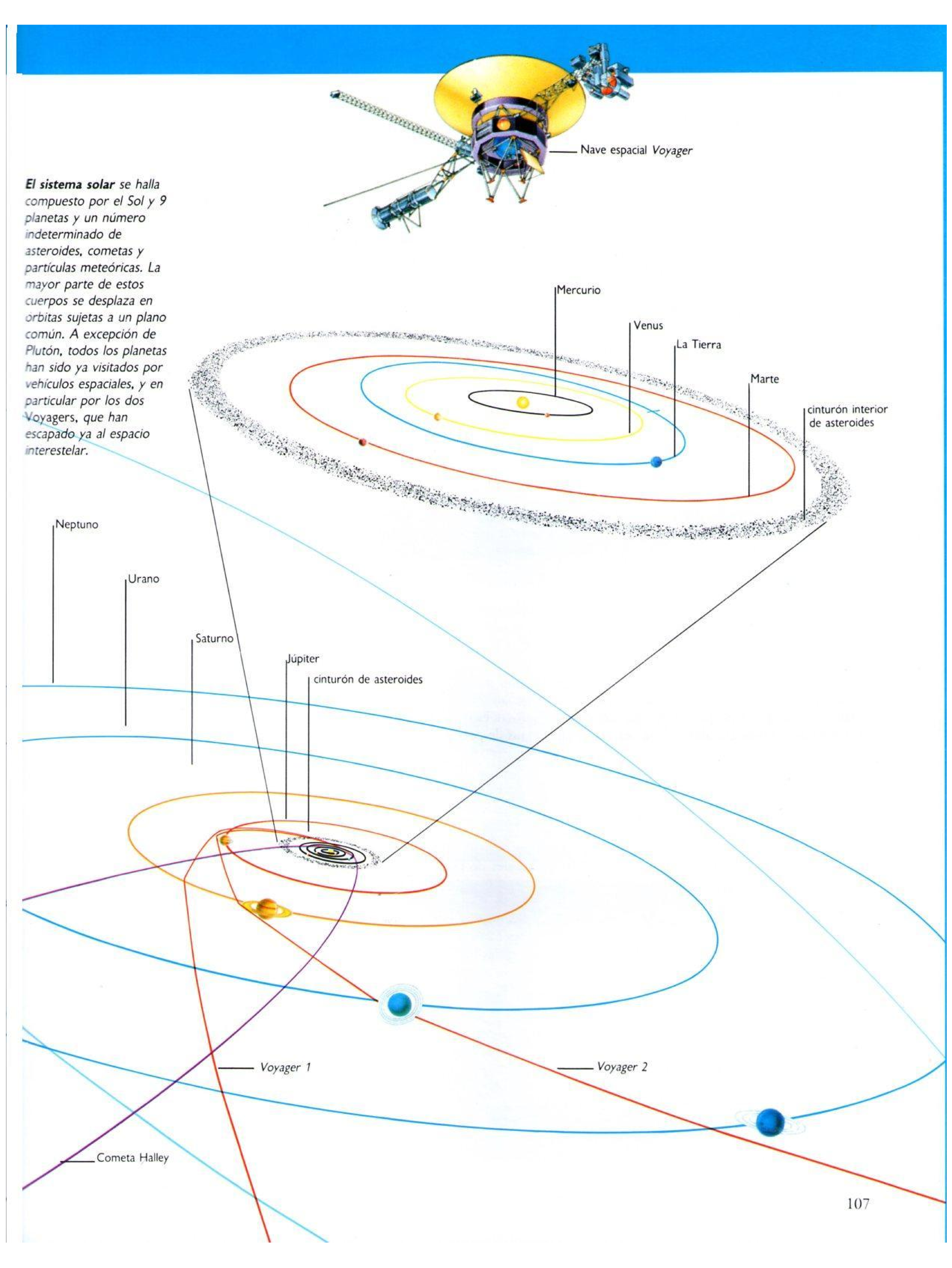
Debido a que los planetas telúricos se hallaban mucho más próximos al Sol que los gigantes gaseosos, recibieron mucho más calor del astro y las moléculas gaseosas ligeras comenzaron a moverse a gran velocidad. Dado que estos planetas son menores que los gigantes gaseosos, ninguno de ellos alcanzaba la fuerza gravitatoria necesaria para detener el rápido desplazamiento de dichas moléculas.

El planeta gigante más distante de nosotros, Neptuno, se encuentra a una distancia media de 4.497 millones de kilómetros, esto es, algo más de 4 horas luz. Dado que la estrella independiente más próxima es Proxima Centauri, situada a 4,3 años luz, es fácil observar que la escala del sistema solar resulta infinitesimal comparada con las distancias interestelares. No obstante, el sistema solar no consiste tan sólo de los planetas principales; existen asimismo numerosos cuerpos de pequeñas dimensiones tales como los asteroides y los cometas. Si bien no existen pruebas definitivas de que las órbitas de los asteroides alcancen grandes distancias no sucede lo mismo con los cometas.

Hoy día se acepta que existen nubes de fragmentos astrales que giran en órbita en torno al Sol. Cada vez que se ve alterada, esta materia forma la base de los cometas y, de hecho, parece probada la existencia de más de una nube de este tipo. La primera es la que da lugar a la aparición de los cometas de período breve, dotados de ciclos orbitales no superiores a los 150 años. La denominamos cinturón de Kuiper, y se extiende entre 6 y 24 horas luz a partir del Sol. A continuación, podría existir otra, más estrecha, que se extiende hasta una distancia aproximadamente 20 veces mayor.

No obstante, la más significativa es el cinturón de Oort, considerada como la fuente principal de materia cometaria. Se extiende a lo largo de una amplia franja de espacio que alcanza entre 4,5 y 15 billones de km de espacio, esto es, entre 6 y 18 meses luz. Así, la nube de Oort nos transporta a distancias aún mayores: algo más de un tercio de la distancia que nos separa de Proxima Centauri.

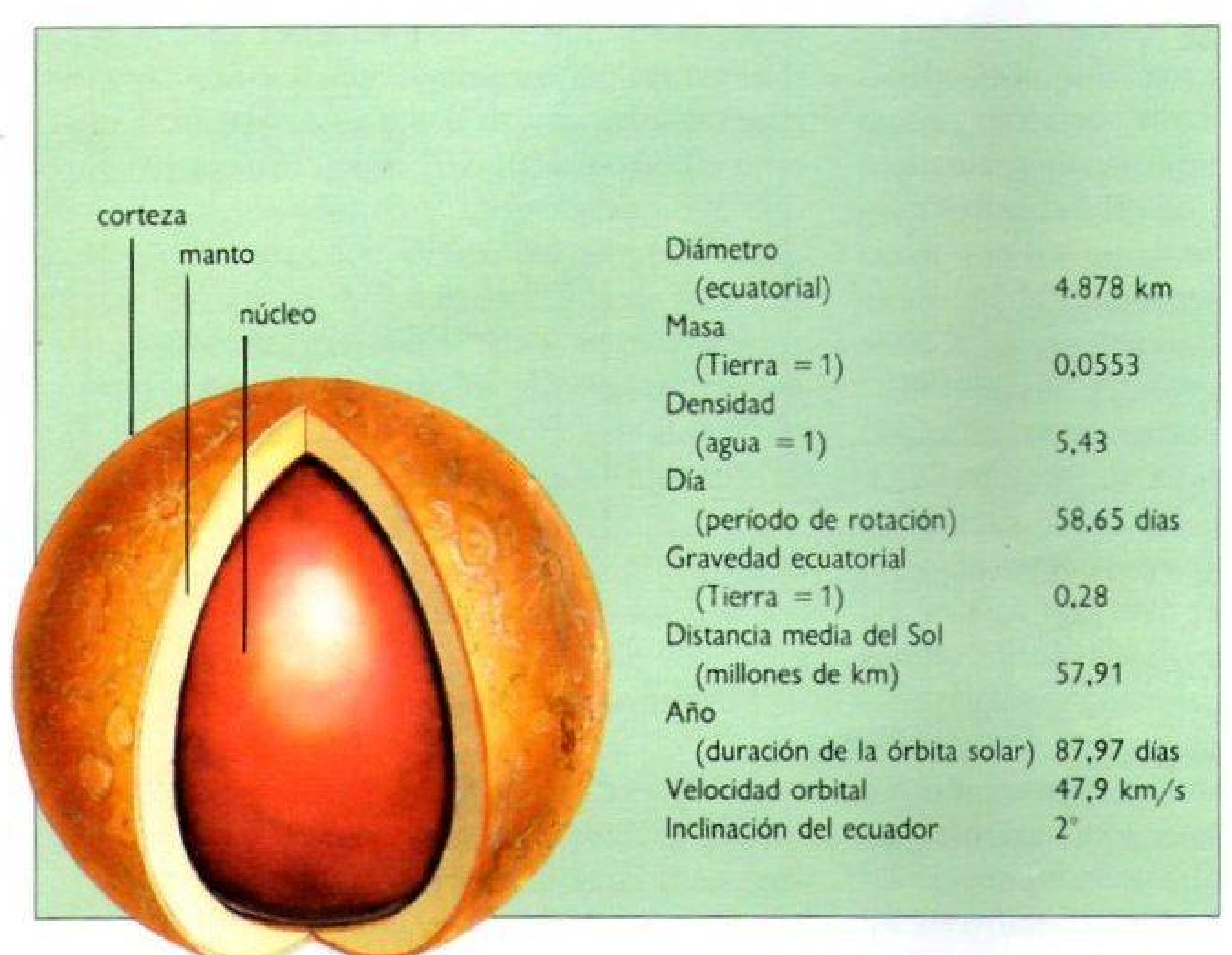
Plutón



El sistema solar *se halla compuesto por el Sol y 9 planetas y un número indeterminado de asteroides, cometas y partículas meteóricas. La mayor parte de estos cuerpos se desplaza en órbitas sujetas a un plano común. A excepción de Plutón, todos los planetas han sido ya visitados por vehículos espaciales, y en particular por los dos Voyagers, que han escapado ya al espacio interestelar.*

MERCURIO

• *El acompañante del Sol*



Diámetro (ecuatorial)	4.878 km
Masa (Tierra = 1)	0,0553
Densidad (agua = 1)	5,43
Día (período de rotación)	58,65 días
Gravedad ecuatorial (Tierra = 1)	0,28
Distancia media del Sol (millones de km)	57,91
Año (duración de la órbita solar)	87,97 días
Velocidad orbital	47,9 km/s
Inclinación del ecuador	2°

Mercurio es un astro brillante, plateado y de aspecto estelar que puede observarse bien inmediatamente antes del amanecer o poco después de la puesta del Sol. Se trata de un mundo abrasado, desprovisto de oxígeno y plagado de cráteres, que se limita a tostarse al calor del Sol.

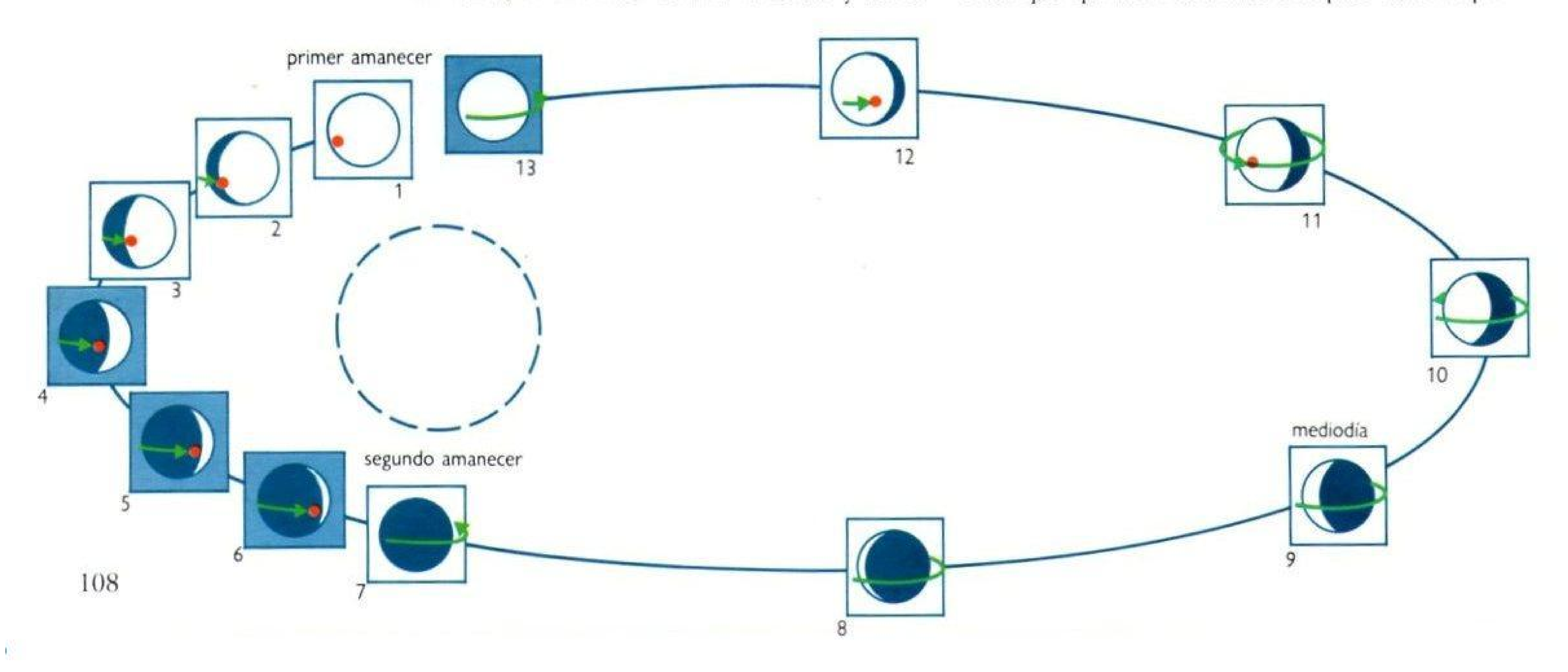
Dado que su órbita coincide con la de la Tierra, Mercurio presenta fases similares a las de nuestra Luna. Así, cuando se encuentra más próximo a nuestro planeta, aparece incluso a través de los mayores telescopios como un mero creciente prácticamente desprovisto de rasgos propios. Su disco sólo puede verse completo cuando se halla a la mayor distancia posible de la Tierra, al otro lado del Sol.

En 1965, el envío de señales de radar y su recepción exitosa tras rebotar en la superficie del planeta hicieron posible una determinación precisa de un período de rotación. Empero, hasta transcurrida una década no fue posible confirmar la cifra obtenida —58,6461 días—, lo que se logró gracias a la nave *Mariner 10*, cuya máxima aproximación a Mercurio tuvo lugar en marzo y septiembre de 1974 y en marzo de 1975.

La superficie de Mercurio se halla plagada de cráteres, y su aspecto es similar al de la Luna. Sin embargo, Mercurio no posee las enormes llanuras de lava —o «mares»— que cubren gran parte de la superficie de la Luna. Han llegado a bautizarse más de 230 de los numerosísimos cráteres mercurianos. El mayor de ellos, llamado Beethoven, posee 625 kilómetros de diámetro. Los astrónomos planetarios opinan que aún hoy siguen formándose cráteres sobre la superficie de Mercurio, del mismo modo que sucede en la Luna. Sin embargo, el aspecto general de la misma indica que la frecuencia de impactos debe ser al menos un 20 % mayor.

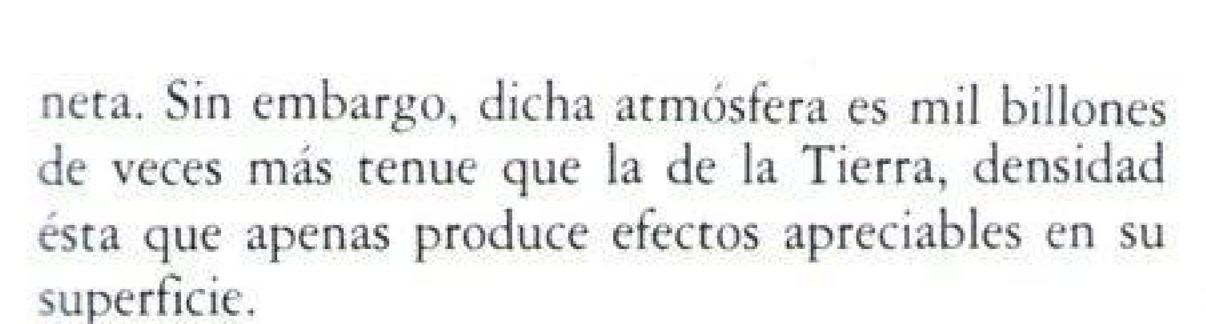
Mercurio nunca se aleja del Sol una distancia superior a los 69,7 millones de km, y su órbita elíptica llega a acercarlo hasta los 45,9 millones de km. Así, se trata de un planeta dominado por el Sol. Dada su proximidad, obtiene al menos 4,7 veces más calor, luz y otras formas de radiación por unidad de superficie que la Tierra, lo que llega a elevar su temperatura superficial a los 467 °C.

Este calor, combinado con el débil campo gravitatorio, hizo que los gases atmosféricos originales del planeta se disolvieran en el espacio hace largo tiempo. Hoy, la poca atmósfera que posee consta de hidrógeno y helio, gases procedentes del viento solar que apenas se detienen a su paso sobre el pla-



En algunos lugares de Mercurio *(punto rojo) puede verse un doble amanecer. El primero (1) al acercarse al Sol. El pequeño ángulo (2-3) que describe entonces el planeta produce la noche en ese punto. Algo más tarde (7) hay un segundo amanecer. La luz del día (8-13) dura casi lo que su año.*





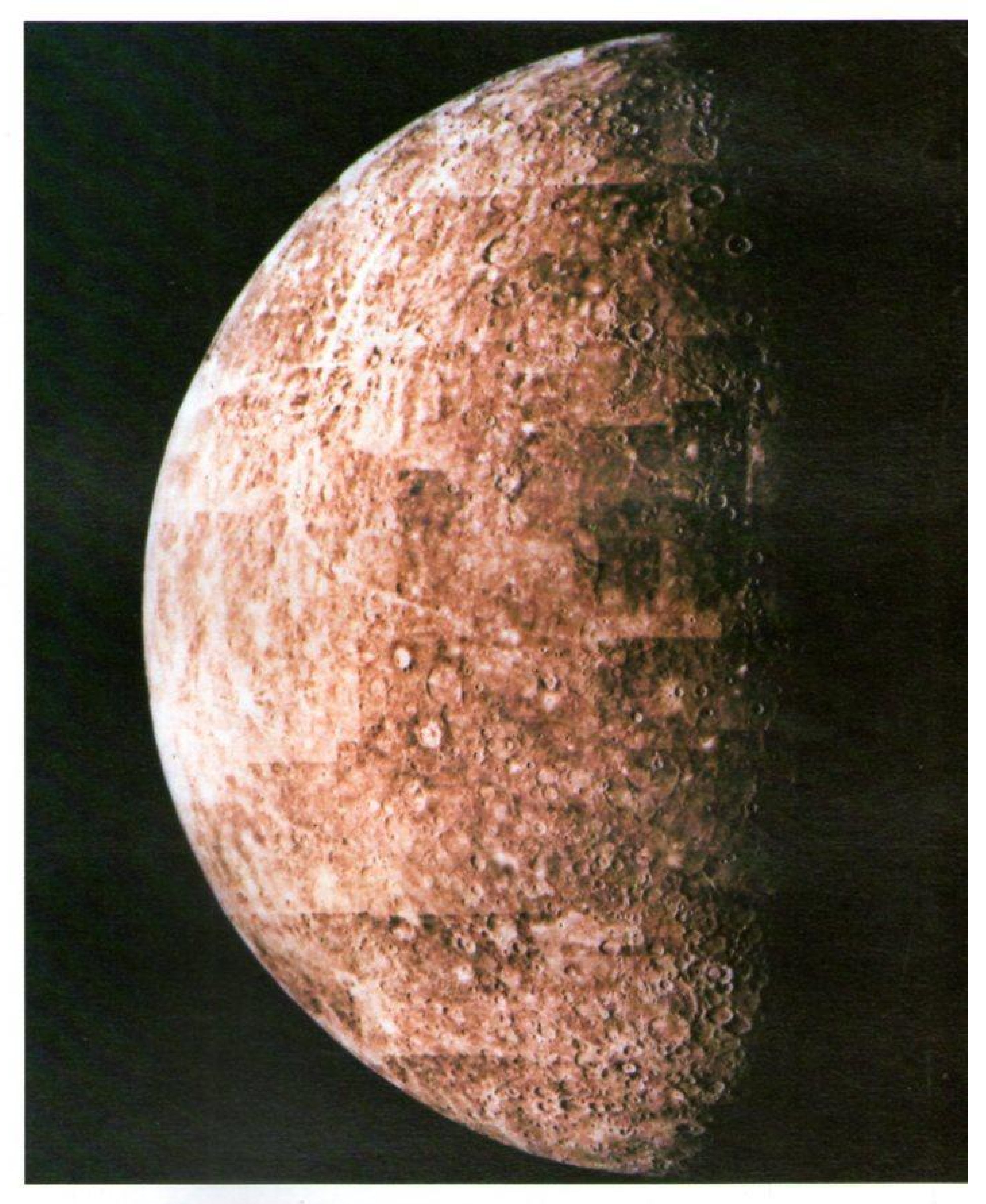
neta. Sin embargo, dicha atmósfera es mil billones de veces más tenue que la de la Tierra, densidad ésta que apenas produce efectos apreciables en su superficie.

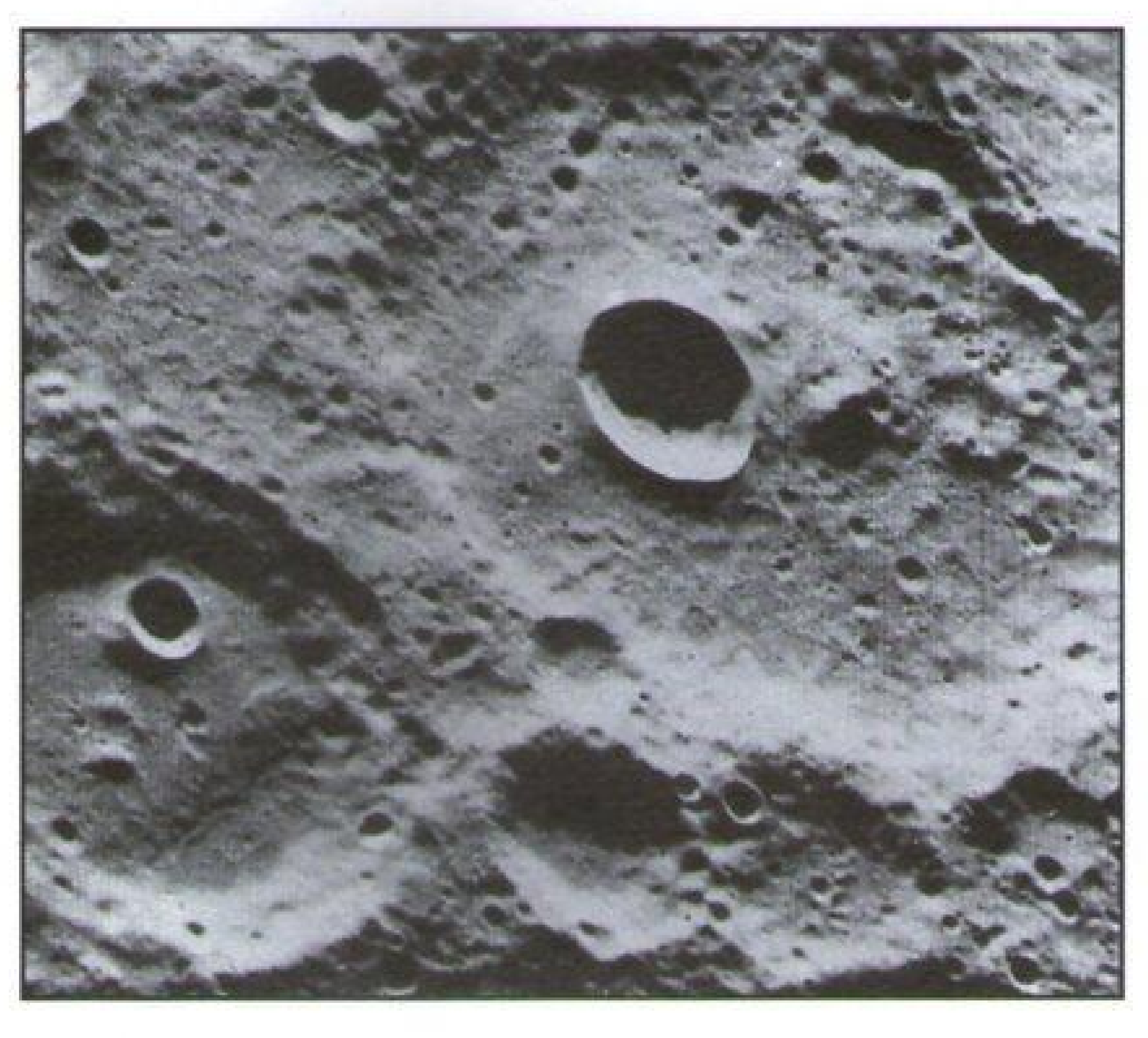
La pequeña masa de Mercurio contribuye a su incapacidad para retener cualquier tipo de atmósfera. Su peso es apenas un 5,5 por ciento el de la Tierra, por lo que su velocidad de escape es 2,6 veces menor. Si bien su diámetro es apenas 1,4 veces mayor que el de nuestra Luna y su aspecto salpicado de cráteres recuerda poderosamente el de ésta, Mercurio es 1,7 veces más denso que nuestro satélite. Ello equivale a 5,4 veces la densidad del agua, es decir, aproximadamente la misma que la de la Tierra. Mercurio debe de parecerse a la Tierra en lo que se refiere a su estructura interna, dotada de un núcleo central de hierro y níquel.

Dicha teoría exige calcular que el núcleo de Mercurio contiene aproximadamente el doble de hierro que la Tierra, así como que su diámetro debe ser de 3.600 km. Así pues, parece que el sólido núcleo de Mercurio es mayor que la Luna. Se supone que el núcleo está rodeado por un delgado manto rocoso, de unos 600 kilómetros de espesor. Sobre el manto se extiende una corteza que no sobrepasa los 66 km de espesor en su parte más gruesa.

A pesar de su aspecto desolado, Mercurio no es un planeta totalmente inerte. Posee regiones «cálidas» debidas a la actividad volcánica existente bajo su superficie y conocidas habitualmente como «polos calientes» por hallarse situadas en extremos opuestos del planeta. El *Mariner 10* mostró que Mercurio posee un campo magnético débil que apenas alcanza la centésima parte de la fuerza con que cuenta el terrestre. No obstante, es más potente que aquellos con los que cuentan la Luna, Venus y Marte. Como sucede con la Tierra, los polos magnéticos de Mercurio no coinciden con sus polos de rotación, sino que se hallan separados de éstos por unos 11 grados de distancia. Sin embargo, la existencia de dicho campo no encaja con la teoría de que el núcleo se halle compuesto de hierro solidificado, dado que los campos magnéticos se gecos se generan a partir de núcleos de hierro derreti-

Si bien el campo magnético ofrece cierta protección frente a la radiación del Sol, la debilidad del campo con que cuenta Mercurio y su carencia casi total de atmósfera hacen que la superficie sufra un continuo bombardeo de peligrosos rayos ultravioletas y rayos X, lo que le convierte en uno de los planetas menos hospitalarios de la familia solar.



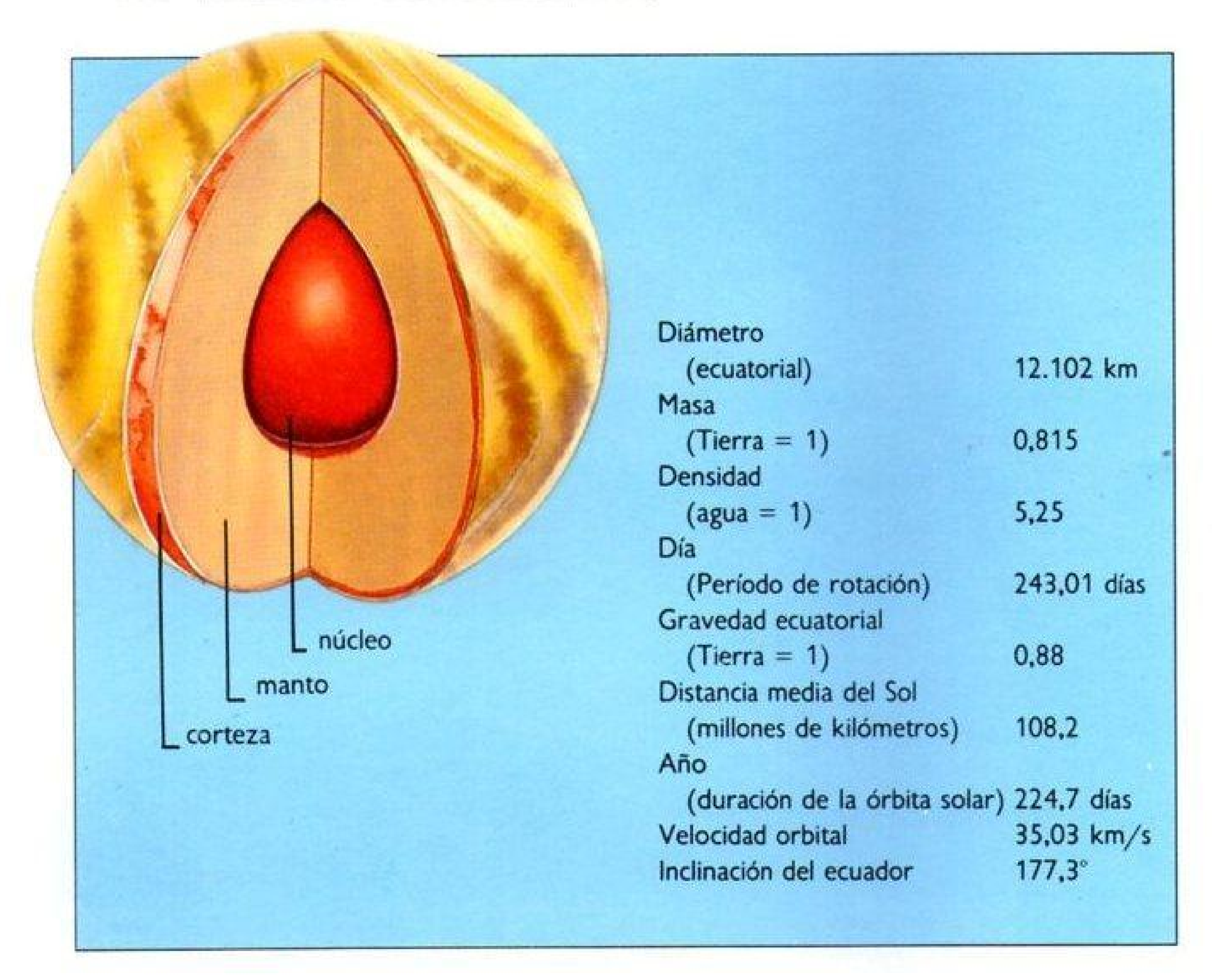


Mercurio está cubierto de cráteres *(arriba) producidos por un bombardeo de meteoritos. La nave espacial* Mariner 10 *obtuvo este mosaico de vistas de Mercurio a lo largo del mes de marzo de 1974.*

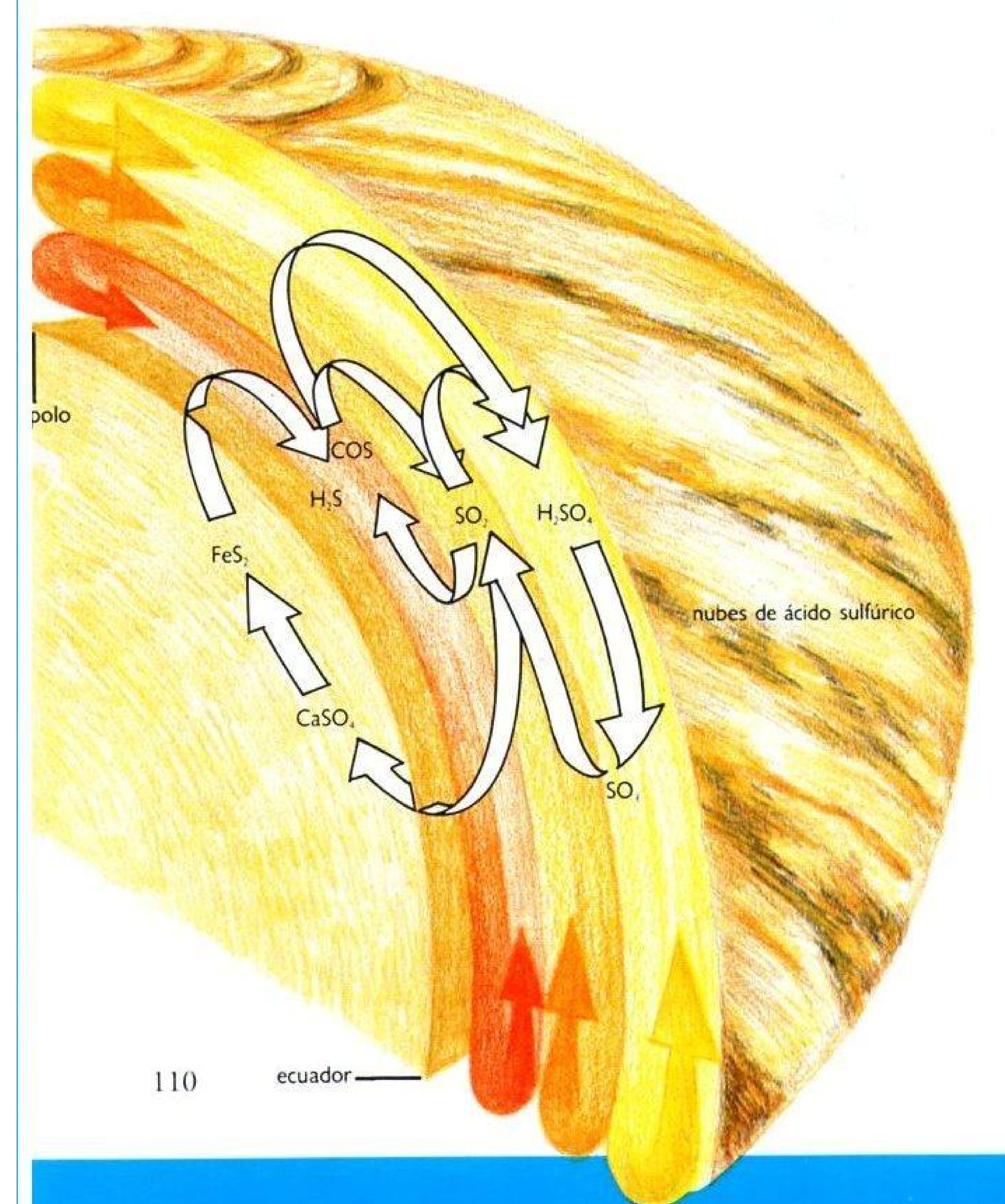
Cráter relativamente nuevo *(izquierda) de unos 12 km de diámetro en el centro de otro más antiguo. La fotografía fue tomada desde una distancia de 20.770 km.*

VENUS

• *El mundo invernadero*



Diámetro (ecuatorial)	12.102 km
Masa (Tierra = 1)	0,815
Densidad (agua = 1)	5,25
Día (Período de rotación)	243,01 días
Gravedad ecuatorial (Tierra = 1)	0,88
Distancia media del Sol (millones de kilómetros)	108,2
Año (duración de la órbita solar)	224,7 días
Velocidad orbital	35,03 km/s
Inclinación del ecuador	177,3°



Aparte de los meteoritos, la Luna y algún que otro cometa ocasional, ningún otro cuerpo celeste se acerca tanto a la Tierra como Venus. Su tamaño, peso y composición son igualmente similares a los de nuestro planeta, y su órbita, si bien más pequeña que la de la Tierra, no es muy diferente en cuanto a tamaño. Sin embargo, la Tierra es templada y contiene vida, mientras que Venus es insoportablemente cálido, posee una atmósfera árida, asfixiante y opresora (la presión en su superficie es de más de 90 kilogramos por centímetro cuadrado) y soporta continuas lluvias de ácido sulfúrico.

Venus se halla más próximo al Sol que la Tierra. Por consiguiente, también muestra distintas fases y sólo puede ser contemplado por un observador situado en la Tierra antes del alba y durante un breve período tras la puesta del sol. Así, la observación de su disco planetario se halla plagada de dificultades, tanto más cuanto que su superficie se halla cubierta por una atmósfera densa y opaca.

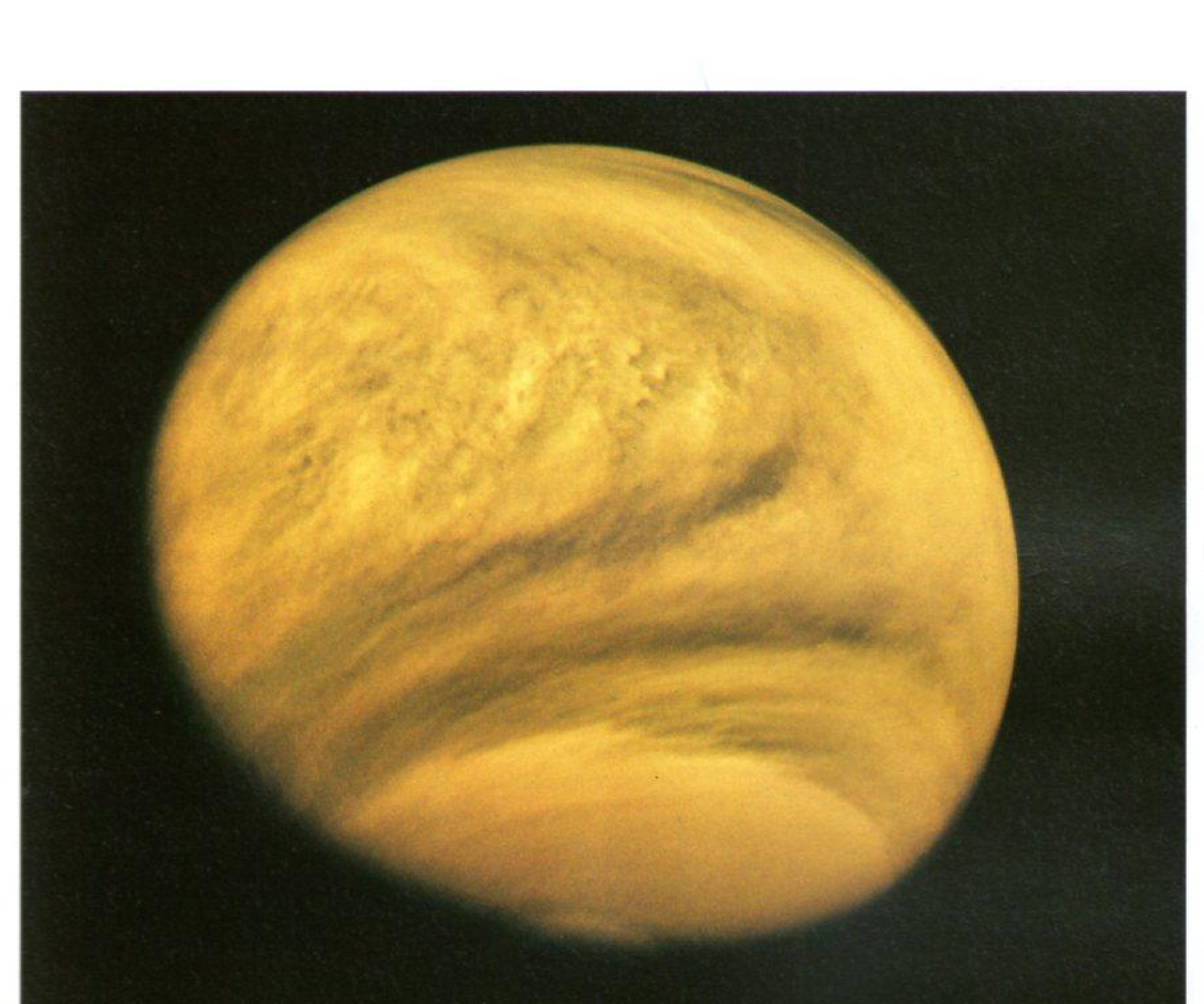
Dado que Venus posee un tamaño similar al de la Tierra —su diámetro es 650 km más corto—, su composición interna es también parecida a la de nuestro planeta, y posee un denso núcleo de níquel y hierro, parte del cual se halla probablemente en estado líquido, que no difiere en gran medida del nuestro. Sobre el núcleo venusiano se extiende un manto rocoso de tamaño similar al de la Tierra. La corteza exterior posee un espesor de 60 km, apoximadamente el doble del de la Tierra.

Al igual que la Tierra, Venus se halla cubierto por una atmósfera de espesor apreciable que, sin embargo, es mucho más densa que la nuestra y llega a ocultar por completo su superficie. El resultado es que el observador terrestre tan sólo consigue distinguir las capas más elevadas.

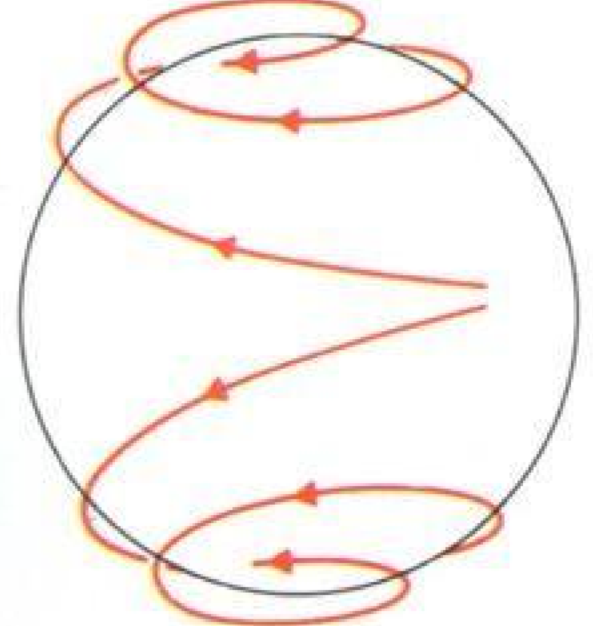
Fueron las mediciones efectuadas por el radar del observatorio radioastronómico de Arecibo las que permitieron, en 1965, determinar que la masa sólida del planeta poseía un período de rotación retrógrada (de este a oeste) de unos 243 días, período que no se halla demasiado lejano al ciclo orbital venusiano de 224,7 días.

Venus ha sido observado por numerosas naves espaciales desde los años sesenta. La Unión Soviética envió diversas sondas: desde la *Venera 1* hasta la *Venera 16* en el período comprendido entre 1961 y 1983 y las denominadas *Vega 1* y *Vega 2* en 1984. Estados Unidos, por su parte, ha enviado los *Mariners 2, 5* y *10,* así como dos naves *Pioneer* en 1978 y la sonda *Magallanes* en 1990.

La atmósfera venusiana se halla azotada por vien-



Densos torbellinos de nubes *cubren a Venus (izquierda). Se piensa que las zonas oscuras cercanas al ecuador son células convectivas causadas por el calor del Sol. Las nubes se desplazan en torno al planeta (abajo) a unos 100 m/s.*



Las nubes de ácido sulfúrico de Venus *son el resultado de complejas reacciones (izquierda en la página opuesta). A lo largo del ciclo atmosférico rápido, la luz solar transforma el dióxido de azufre (SO_2) en ácido sulfúrico (H_2SO_4). En el ciclo atmosférico lento, el sulfito de hidrógeno (H_2S) y el oxisulfuro de carbono (COS) se convierten en H_2SO_4. En ambas reacciones intervienen el dióxido de carbono y el vapor de agua. En la atmósfera interior, el H_2SO_4. En la atmósfera interior, el H_2SO_4 se descompone para formar trióxido de azufre (SO_3). En el ciclo de la corteza, las piritas de hierro (FeS_2) reaccionan con el vapor de agua y el dióxido de carbono para producir H_2S y COS, que a su vez reaccionan con el oxígeno para formar SO_2. El exceso de dióxido de azufre forma sulfato cálcico ($CaSO_4$), el cual produce igualmente piritas de hierro.*

tos que soplan de este a oeste, en la misma dirección de la rotación axial del planeta. Toda su atmósfera circula de norte a sur y luego de sur a norte. El acercamiento en 1984 del *Mariner 10* y del *Pioneer Venus Orbiter* en 1979 permitió realizar mediciones que mostraron que las nubes de las capas altas de la atmósfera giran a gran velocidad, alcanzando en su parte superior velocidades de 100 metros por segundo (360 kilómetros por hora), por lo que tan sólo tardan cuatro días en recorrer la totalidad del planeta. Sin embargo, cerca del nivel del suelo, los vientos son relativamente lentos, pues apenas alcanzan 1 metro por segundo.

La atmósfera venusiana es muy distinta de la de la Tierra. Se halla dominada en un 96 por ciento por el dióxido de carbono, y contiene asimismo un 3,5 por ciento de nitrógeno y un 0,5 por ciento compuesto de los siguientes gases en orden decreciente: dióxido de azufre, vapor de agua, argón y monóxido de carbono.

Esta inmensa cantidad de dióxido de carbono proporciona a la atmósfera de Venus gran profundidad y densidad, por lo que la presión atmosférica al nivel del suelo es demoledora: 90 veces mayor que la de la Tierra. Las partículas que flotan en suspensión en la atmósfera se componen de ácido sulfúrico y se presentan en dos capas. La inferior flota a una altura de entre 50 y 80 kilómetros sobre la superficie del suelo. En la superior, más fría, el vapor de agua se combina con el azufre para formar gotitas de ácido sulfúrico en forma de nube.

Debido a la gran densidad de la atmósfera venusiana y al predominio de dióxido de carbono, el planeta sufre un pronunciado efecto invernadero: la radiación solar se ve atrapada por la atmósfera, lo que calienta el planeta. Así, mientras la temperatura media de la superficie terrestre es de 27 °C, la de Venus alcanza los 475 °C, muy por encima del punto de fusión del plomo.

Antes de que se conociera en detalle la superficie del planeta, los rasgos físicos de Venus eran objeto de especulación. La mayor parte de las teorías

se basaba en la similitud de tamaño entre la Tierra y Venus, en el hecho de que Venus recibía el doble de radiación solar que la Tierra —dado que su órbita es mucho más próxima al Sol— y en la circunstancia de que el albedo (reflectividad) del planeta es relativamente alto. Los científicos dedujeron que debían de existir vastos océanos que cubrieran casi toda la superficie venusiana. Dicha opinión se mantuvo hasta verse dementida por las averiguaciones de los vehículos espaciales.

Han existido dos tipos de investigación espacial de Venus: los vehículos orbitales y los de aterrizaje. Sobre la superficie del planeta se han posado trece sondas. Algunas de ellas han realizado mediciones de la atmósfera durante su aproximación antes de estrellarse contra la superficie del planeta, mientras que otras se han posado suavemente, nos han eviado imágenes de vídeo de la superficie y han analizado el suelo. La mayor parte de ellas no logró transmitir durante demasiado tiempo: apenas un par de horas como máximo.

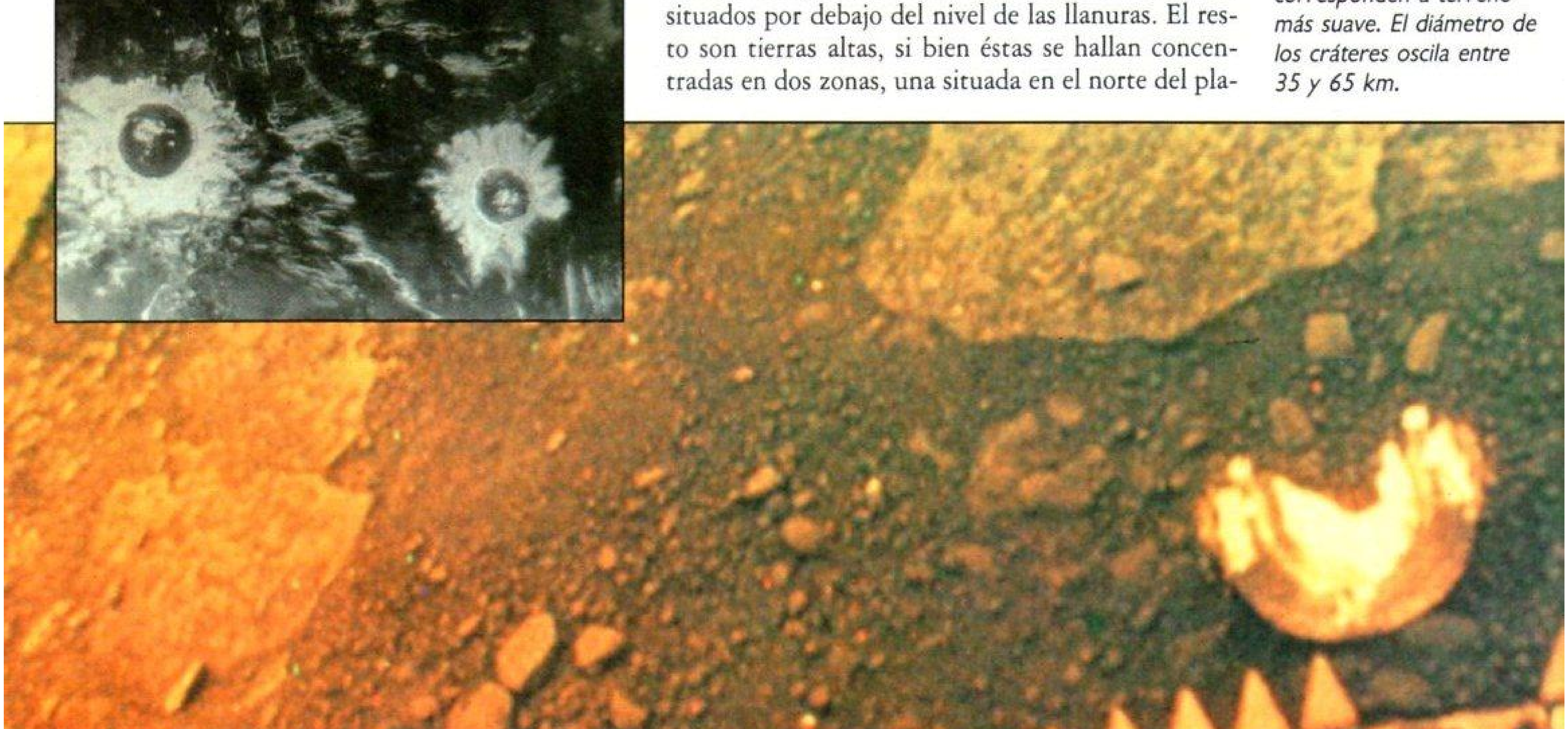
Tanto el *Venera 13* como el *Venera 14* —ambos llegaron a Venus en 1982— aterrizaron suavemente. Cada una de dichas naves envió imágenes de vídeo de un panorama completo (180 grados) de diferentes partes de la superficie.

La primera mostraba un terreno relativamente suave, con una superficie que parecía poseer una cubierta arenosa formada por pequeños gránulos originados probablemente por un proceso de erosión (los científicos piensan que originalmente pudo realizarla el agua) y luego solidificada por gotas y gases atmosféricos. La superficie aparecía asimismo regada de restos de pequeñas rocas de diversos tamaños.

El *Venera 14,* que aterrizó a casi 950 km del *Venera 13,* mostraba una escena ligeramente distinta. Una vez más, parte de la superficie aparecía sembrada de pequeños guijarros y rocas, pero el resto del terreno estaba cubierto de placas de materia planas que mostraban señales de haber sufrido erosión y solidificación. Las placas poseían un aspecto afilado y anguloso, si bien se hallaban desprovistas de cubierta arenosa, lo que llevó a los geólogos planetarios a sugerir que se trataba de una zona de formación relativamente reciente, probablemente hace unos 10 millones de años. El análisis del suelo mostró que se trataba de una especie de basalto similar al de los océanos terrestres, si bien dotado de una mayor concentración de potasio.

El segundo método de investigación de la superficie por medio de naves espaciales se ha llevado a cabo con la ayuda de mediciones de radar realizadas durante el acercamiento orbital al planeta. Así, se han enviado pulsaciones de radio en onda corta que han logrado atravesar la nubosa atmósfera y alcanzar la superficie, desde donde han sido reflejadas y recibidas por los equipos de radar que las habían enviado. El análisis computerizado de los resultados ha permitido realizar mapas de la superficie del planeta. La nave *Magallanes,* en particular, ha suministrado imágenes asombrosamente detalladas.

La mayor parte de la superficie —en torno al 70 por ciento de la misma— se compone de llanuras lisas. El 30 por ciento restante consiste en terrenos situados por debajo del nivel de las llanuras. El resto son tierras altas, si bien éstas se hallan concentradas en dos zonas, una situada en el norte del pla-



La superficie de Venus *(abajo) vista en una imagen compuesta procedente de la nave espacial soviética Venera 13, parte de la cual resulta visible en primer plano. El motivo exacto que produce la erosión de la roca no se conoce, dado que la superficie no posee agua y apenas soplan vientos. Una imagen de radar tomada posteriormente, en 1990, por la sonda Magallanes (izquierda) muestra tres cráteres situados en una de las llanuras septentrionales de Venus. El color brillante indica terreno áspero, mientras que las zonas oscuras corresponden a terreno más suave. El diámetro de los cráteres oscila entre 35 y 65 km.*

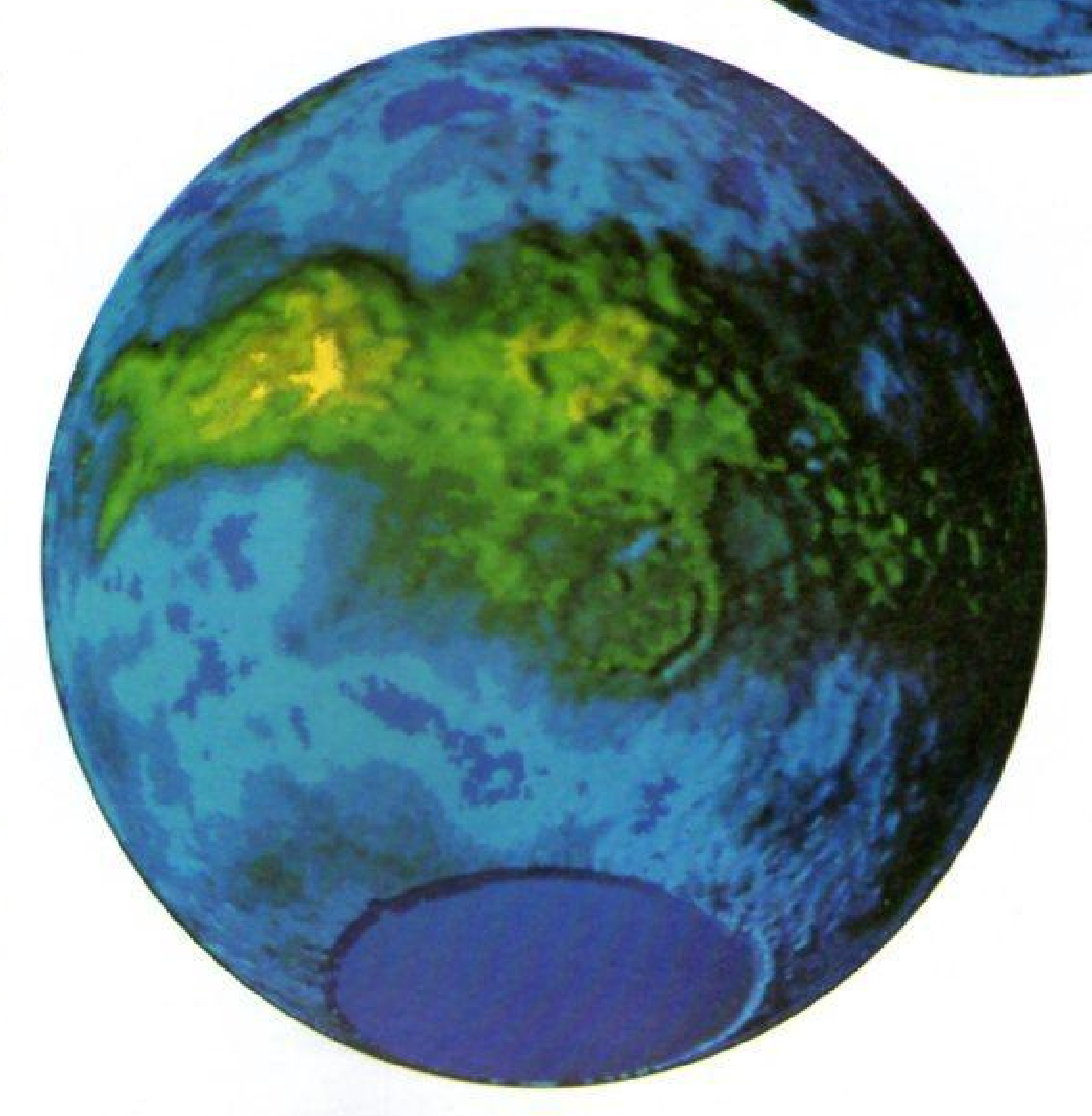
neta y la otra casi coincidente con el ecuador venusiano. La región septentrional ha sido bautizada con el nombre de Ishtar Terra, y se halla circundada por las cordilleras de montañas Maxwell y Akna al este y al oeste de la región elevada respectivamente. Ishtar Terra no se compone tan sólo de tierras altas, y cubre una zona que supera en extensión al continente norteamericano. En su mayor parte descansa a unos pocos kilómetros de altura por encima de la superficie plana, si bien las montañas Maxwell se elevan hasta 12 kilómetros por encima de la primera. Por otra parte, una enorme llanura lisa cubre al oeste una zona de más de 2.500 kilómetros de longitud.

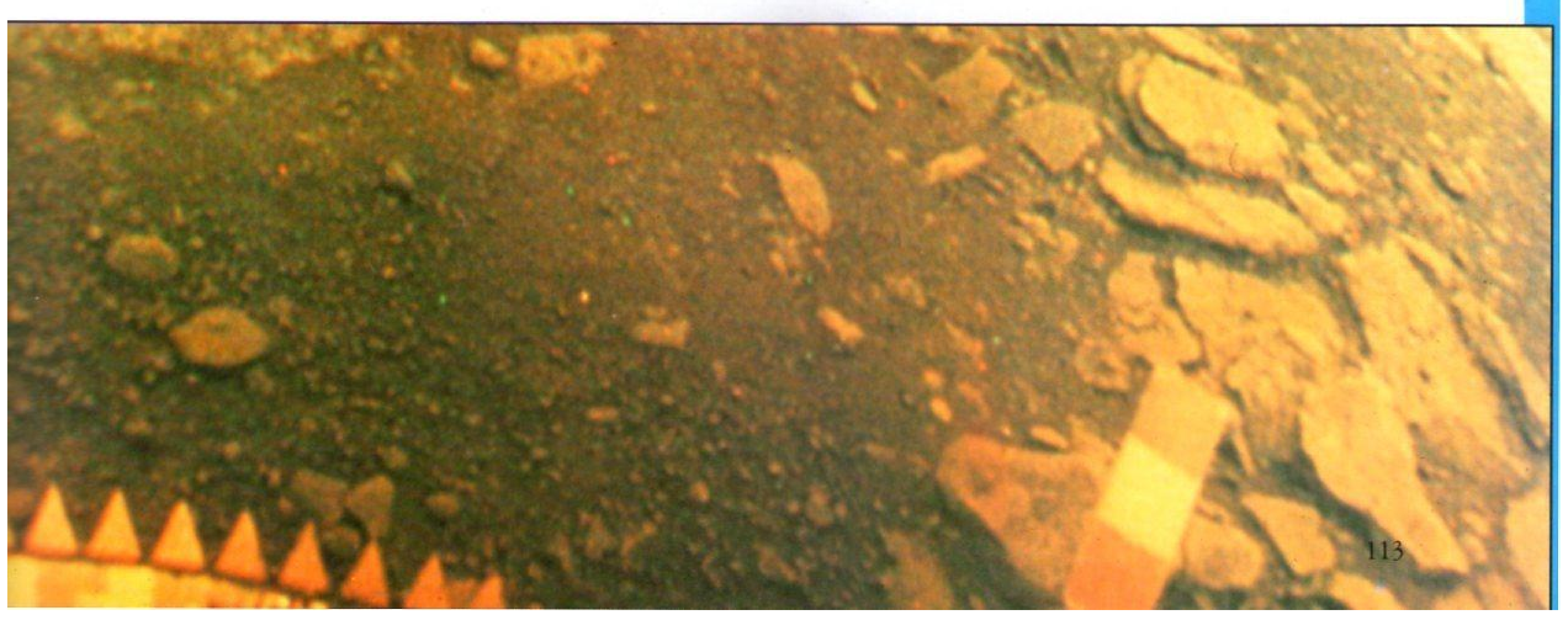
La zona de tierras altas del ecuador se conoce como Aphrodite Terra y comprende un área equivalente a la mitad de África. Parece más escabrosa y también más compleja que Ishtar, atravesada por algún que otro profundo cañón a lo largo del este de las regiones centrales. Dichos cañones poseen una anchura de cientos de kilómetros y una longitud superior a los mil kilómetros. Algunos de ellos tienen hasta 3 kilómetros de profundidad.

Las tierras bajas venusianas pueden ser redondeadas o anchas y alargadas. Aquí y allí, se distinguen ligeras depresiones circulares rematadas a menudo por una «montaña» central. El diámetro de estas depresiones oscila entre 40 y 1.700 km de longitud. Pueden muy bien haber sido causadas por impactos. De ser así, ello indicaría que al menos parte de la superficie venusiana posee una antigüedad de varios miles de millones de años.

Los científicos parecen hoy convencidos de que la superficie de Venus ha sufrido impactos, erupciones volcánicas y plegados y fallas en sus estratos. Ésta resulta sorprendentemente variada, lo que sugiere que los cambios geológicos que dieron lugar a la misma tuvieron lugar antes de que la atmósfera venusiana evolucionara hasta su estado actual.

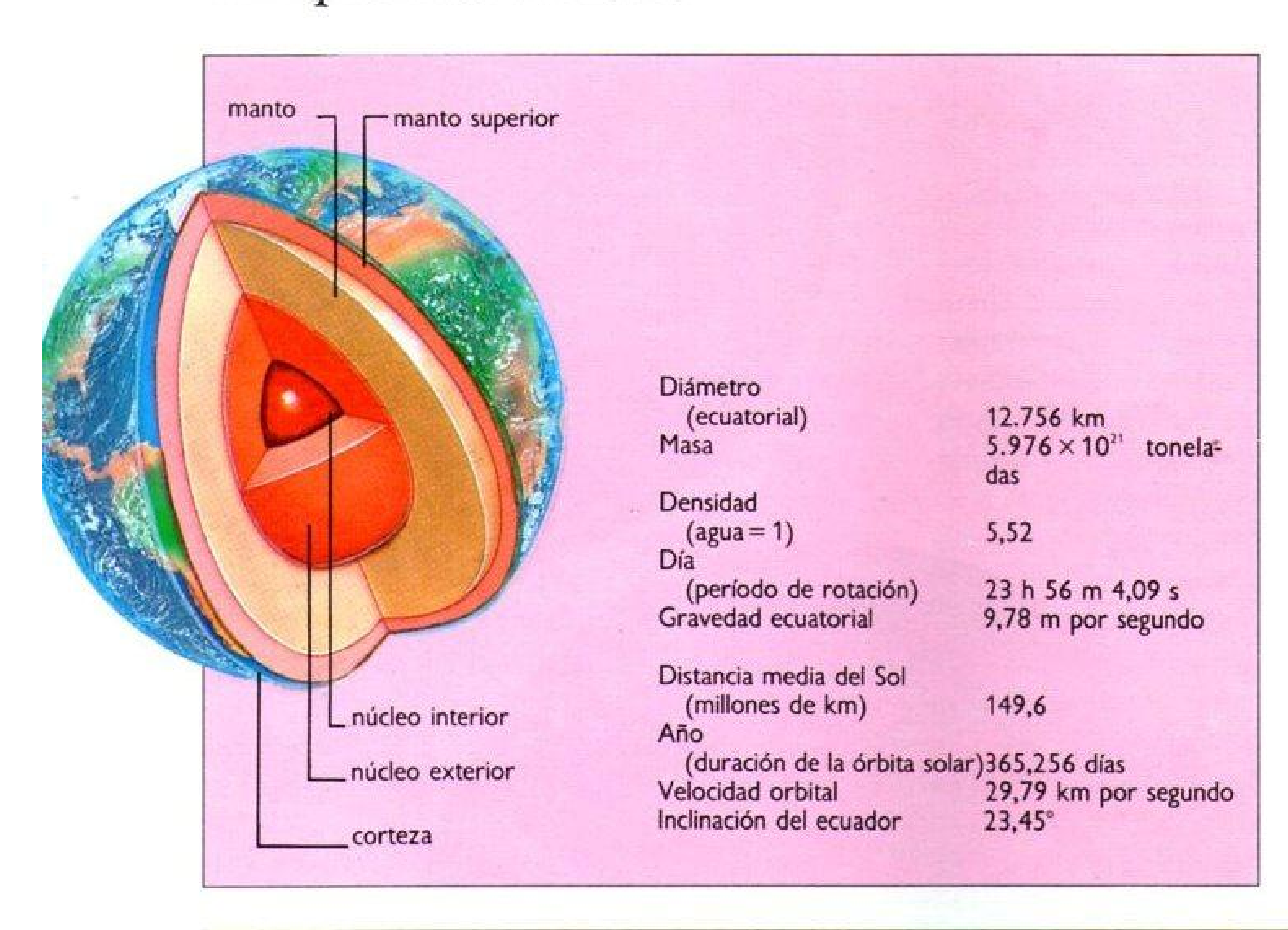
Venus cartografiado por radar *(derecha y abajo) en imágenes de computador. El globo superior muestra las tierras altas de Ishtar Terra en amarillo cerca del polo norte. La zona ecuatorial de tierras altas —Aphrodite Terra— aparece en la imagen inferior en verde. El planeta se halla compuesto en su mayor parte por tierras bajas, coloreadas en azul.*





LA TIERRA

• *El planeta viviente*



Diámetro (ecuatorial)	12.756 km
Masa	5.976×10^{21} toneladas
Densidad (agua = 1)	5,52
Día (período de rotación)	23 h 56 m 4,09 s
Gravedad ecuatorial	9,78 m por segundo
Distancia media del Sol (millones de km)	149,6
Año (duración de la órbita solar)	365,256 días
Velocidad orbital	29,79 km por segundo
Inclinación del ecuador	23,45°

Como es lógico, los científicos saben más acerca de nuestro hermoso y acogedor mundo que de ningún otro del universo, pues tienen la oportunidad de experimentar con él directamente, interpretar los datos obtenidos y sacar las conclusiones oportunas.

A juzgar por la información de que disponen, los científicos planetarios se hallan hoy razonablemente seguros de que la Tierra posee un núcleo central de níquel-hierro. Dicho núcleo se divide en dos partes: un centro metálico de 2.500 km de diámetro y una capa que lo circunda en la que el hierro y el níquel aparecen en estado líquido. Esta sección líquida posee unos 2.200 km de espesor.

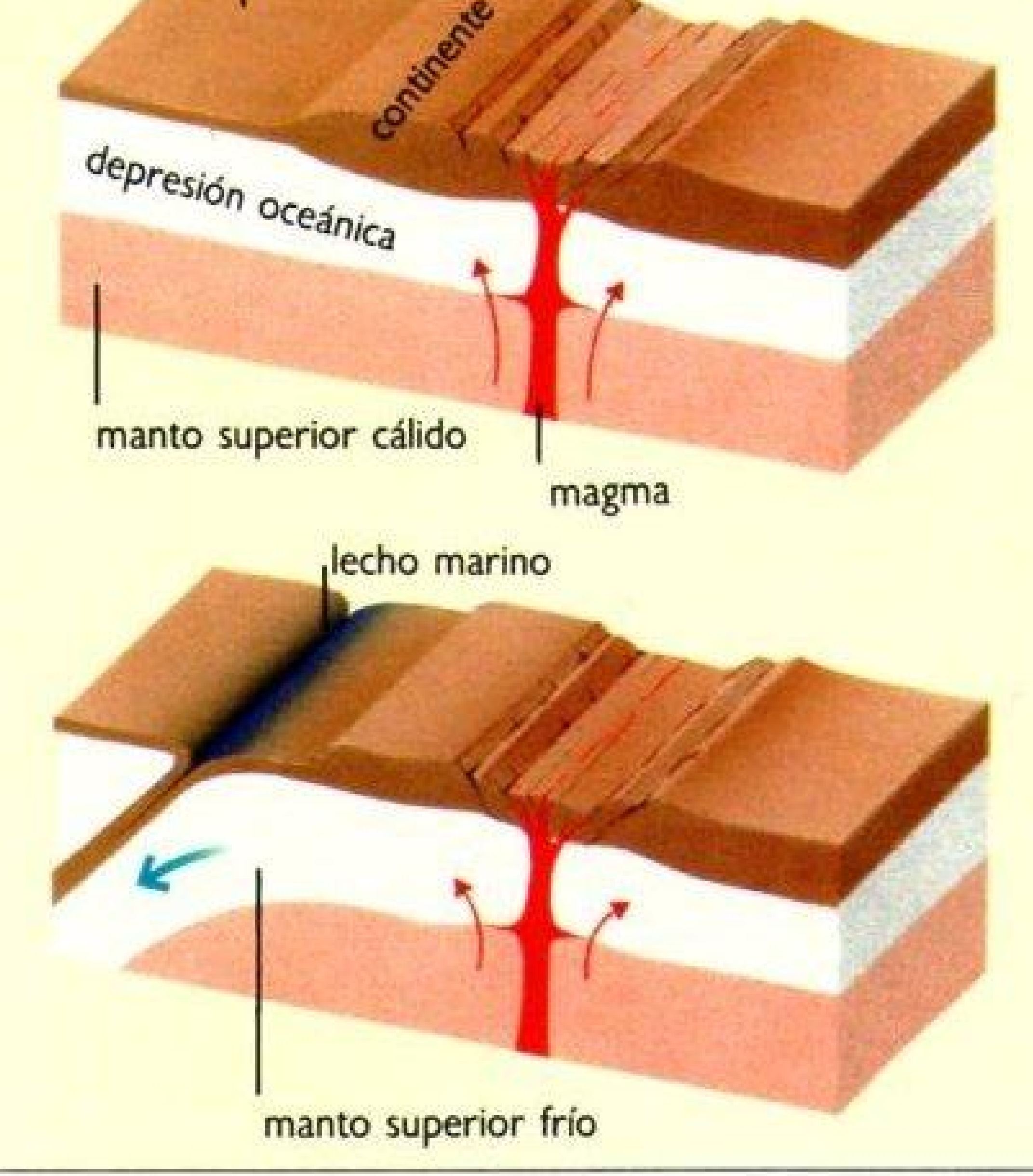
Por encima del núcleo, la Tierra posee una espesa capa rocosa de unos 2.900 km de profundidad denominada manto. El manto inferior es razonablemente rígido; el manto superior consiste en una capa más flexible conocida como astenosfera y una capa rígida de unos 100 km de grosor llamada litosfera. La parte superior de la litosfera es la cor-

La corteza terrestre

Los geólogos opinan que la corteza terrestre se halla dividida en seis placas rígidas principales y diversas placas secundarias que flotan sobre una capa «elástica» del manto. Dichas placas se desplazan por las corrientes de convección, que transportan el calor del núcleo derretido hasta la superficie.

Allí donde esto ocurre, habitualmente en el lecho de los océanos, se crean nuevos suelos marinos que empujan la corteza hacia los lados. El resultado es un fondo compuesto de rocas basálticas relativamente densas. El ritmo actual de deriva separa a Europa de Norteamérica al ritmo de unos 2 centímetros al año. Allí donde se crean nuevos lechos pueden observarse riscos submarinos en los que la nueva materia al rojo vivo entra en contacto con las heladas aguas del océano.

Las placas de la corteza *terrestre se han desplazado a lo largo de los tiempos hasta crear los océanos y continentes que hoy conocemos. Hace unos 300 millones de años, existía un único continente: Pangaea.*



Cuando el magma surge *bajo los continentes procedentes de las regiones más cálidas del manto (derecha, arriba) puede abrirse paso a través de la corteza. En ese punto, la corteza más delgada se convertirá en un nuevo lecho oceánico. Allí donde se produzca la colisión de dos placas (derecha, abajo), una podrá hundirse bajo la otra creando una depresión.*

Laurasia
Gondwana

Pangaea se dividió *en Laurasia –formada por Norteamérica y Eurasia– y Gondwana, formada por Sudamérica, Australia, África, India y la Antártida. Se cree que la placa continental originaria era tan inmensa que se vio dividida por el ascenso de una corriente convectiva que puso en movimiento las placas más pequeñas.*







teza terrestre, eso es, la superficie que habitamos. El espesor de dicha corteza varía; las cortezas continentales poseen entre 30 y 40 km de espesor, mientras que las cortezas de los lechos marinos poseen tan sólo 5 km de espesor.

La capa litosférica se halla formada por numerosas placas que se desplazan sobre el manto. Las pruebas de la existencia de grandes desplazamientos de las masas continentales provienen del examen de formaciones rocosas y fósiles, de la polaridad magnética de las rocas y de las formas de los continentes. Dichas pruebas demuestran asimismo que en otro tiempo —probablemente hace unos 160 millones de años— los continentes terrestres formaban dos vastas masas de tierra que fueron separándose hasta formar los continentes que conocemos hoy en día. La deriva de los continentes continúa todavía.

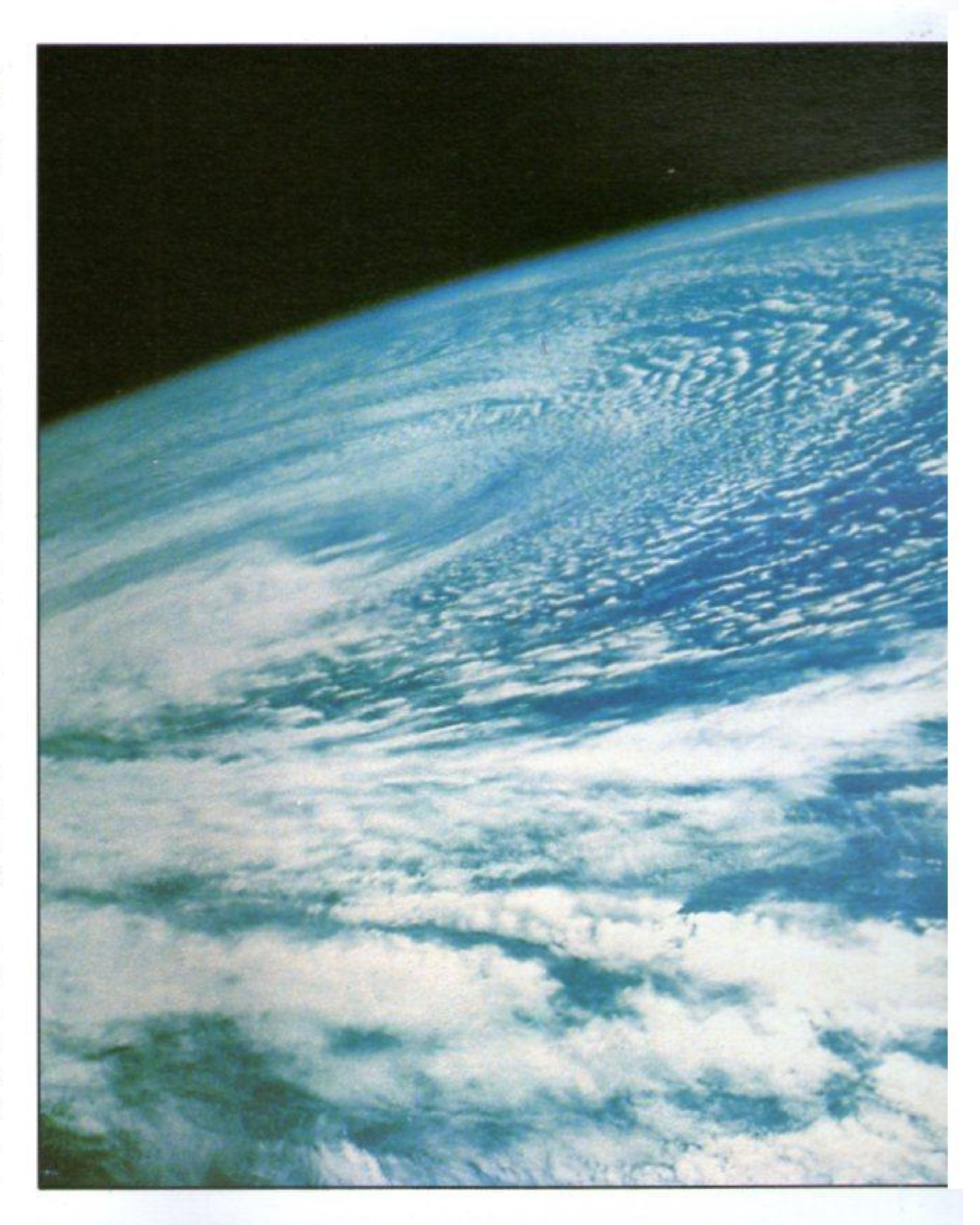
Sobre la superficie de la Tierra se extiende la atmósfera, una capa absolutamente vital para la existencia y el mantenimiento de la vida que la puebla. Se compone de cierto número de gases: nitrógeno (77 por ciento), oxígeno (21 por ciento), vapor de agua (1 por ciento) y un gas inerte, el argón (0,93 por ciento). Contiene asimismo vestigios de dióxido de carbono, neón, helio y azufre.

Uno de los rasgos más importantes de la atmósfera es que cubre la totalidad de la superficie de la Tierra como si fuera una manta, evitando que el calor obtenido del Sol escape al espacio. Dicho efecto se denomina efecto invernadero, y consiste en que ciertos gases de la atmósfera devuelven a la Tierra la radiación infrarroja evitando su desaparición. Entre estos gases se incluye el óxido nitroso, el metano y, sobre todo, el dióxido de carbono.

Se calcula que desde el comienzo de la Revolución Industrial la cantidad de dióxido de carbono en la atmósfera se ha duplicado como resultado de la combustión de combustibles «fósiles» tales como el carbón, el petróleo y el gas, así como debido a la enorme deforestación sufrida. Actualmente, los científicos pronostican que la temperatura media de la Tierra sufrirá un incremento considerable como resultado del aumento de dióxido de carbono. Los efectos de dicho incremento resultan impredecibles y, en el peor de los casos, podrían resultar catastróficos.

El clima que experimentamos es el resultado de la compleja circulación de la atmósfera, impulsada por el calor procedente del Sol. El aire cálido y húmedo se eleva sobre los trópicos y se desplaza en dirección a los polos. A unos 30 grados de latitud de ambos hemisferios se enfría y desciende, regresando luego al ecuador. Existen asimismo remolinos generados por las diferencias de temperatura entre los océanos y las masas terrestres continentales y, para complicar aún más las cosas, la rápida rotación de la Tierra convierte estos remolinos en torbellinos de aspecto cambiante.

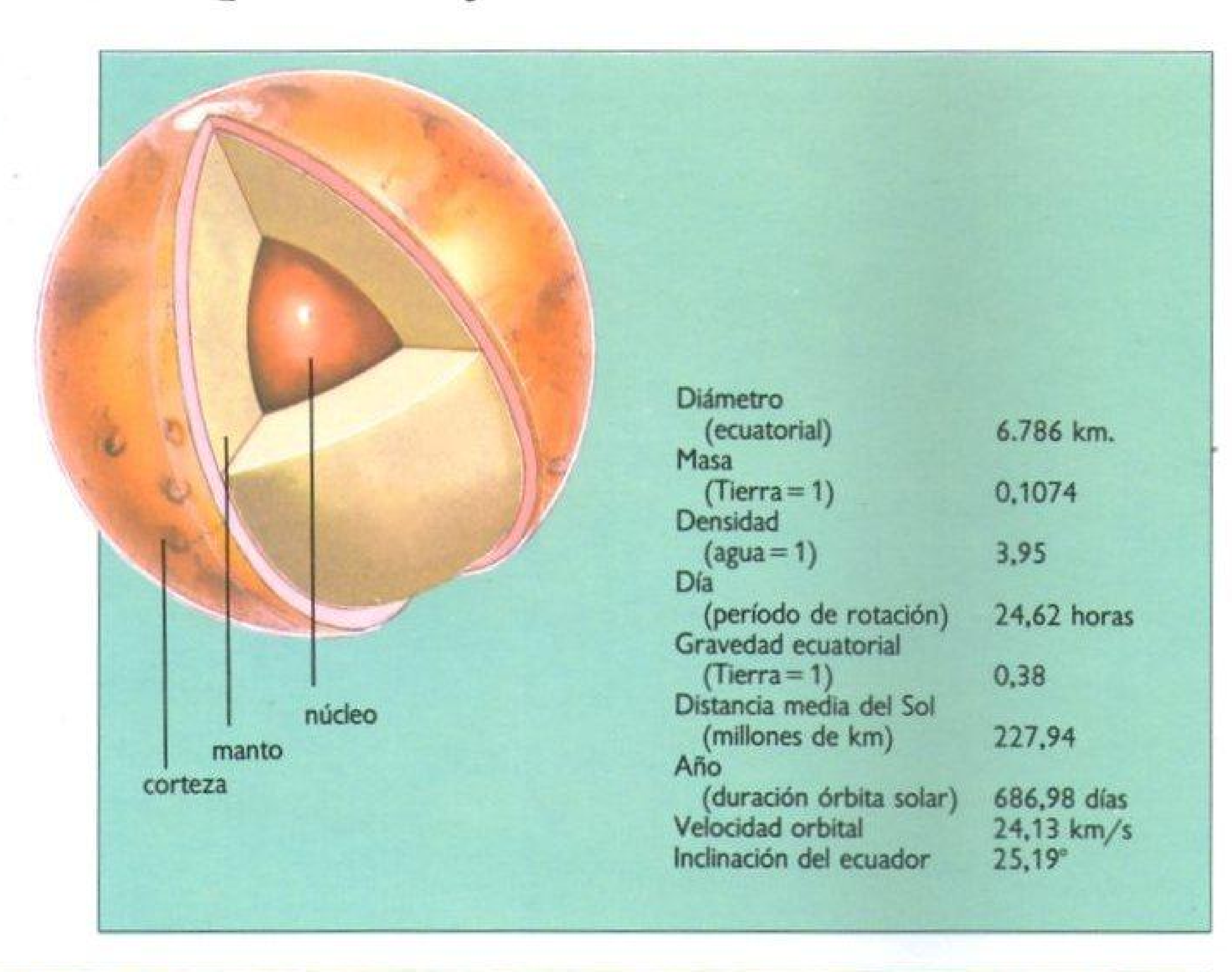
En principio, sin embargo, resulta relativamente fácil describir la circulación de la atmósfera terrestre. Los vientos del este procedentes de los polos chocan con los vientos del oeste originados en las latitudes más templadas. Mientras tanto, los trópicos se ven azotados por vientos alisios procedentes del noroeste en el hemisferio norte y del sudeste en el hemisferio sur. Los vientos alisios se hallan separados por «depresiones» de bajas presiones en las regiones ecuatoriales.



Para un observador espacial *el constante cambio de los dibujos climáticos terrestres contrastaría con la superficie inmóvil de los continentes y los océanos. Masas de aire caliente ascienden, se enfrían y el vapor de agua se condensa formando nubes y causando la lluvia. Nuevas oleadas de aire ascendente forman espirales causadas por la rotación de la Tierra, creando así los diseños nubosos de las tormentas.*

MARTE

• *El planeta rojo*



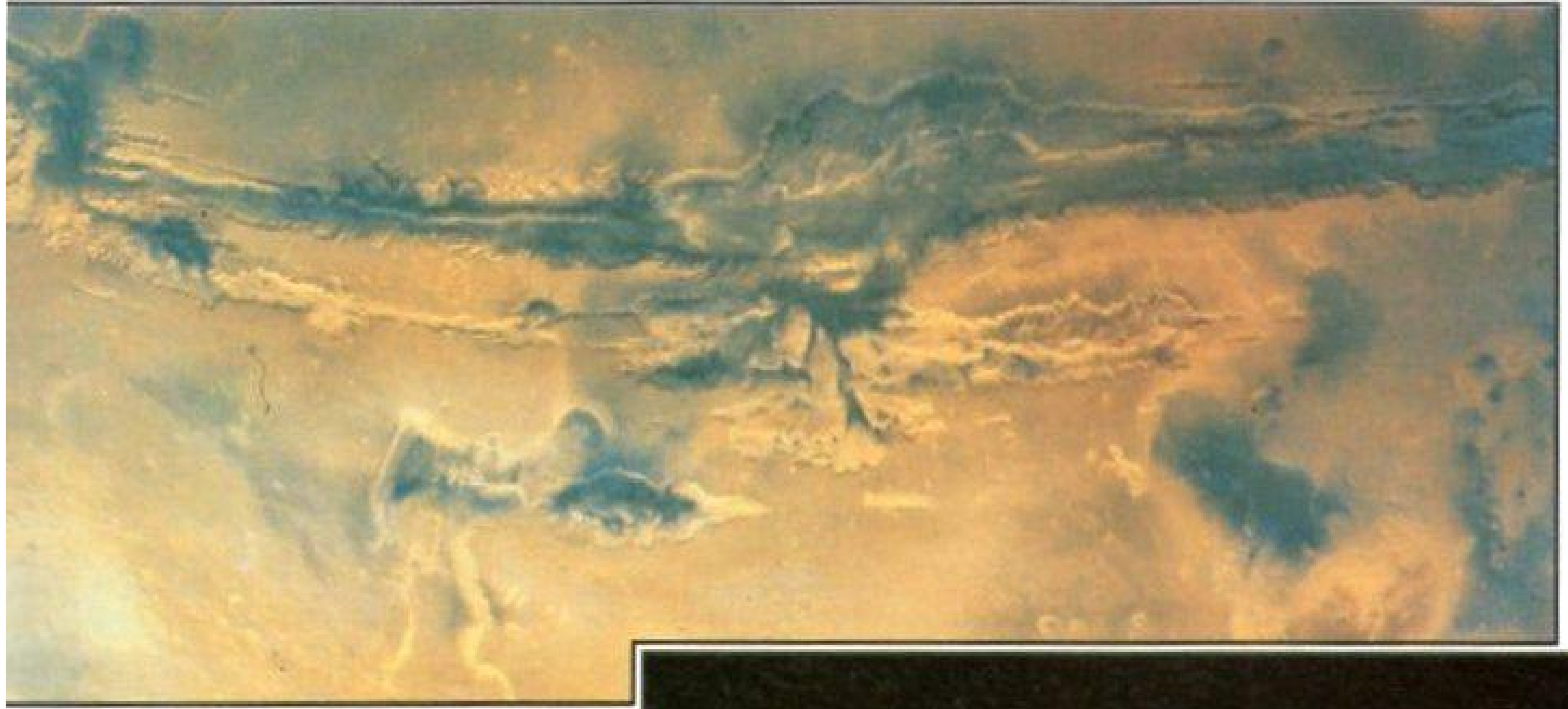
Diámetro (ecuatorial)	6.786 km.
Masa (Tierra = 1)	0,1074
Densidad (agua = 1)	3,95
Día (período de rotación)	24,62 horas
Gravedad ecuatorial (Tierra = 1)	0,38
Distancia media del Sol (millones de km)	227,94
Año (duración órbita solar)	686,98 días
Velocidad orbital	24,13 km/s
Inclinación del ecuador	25,19°

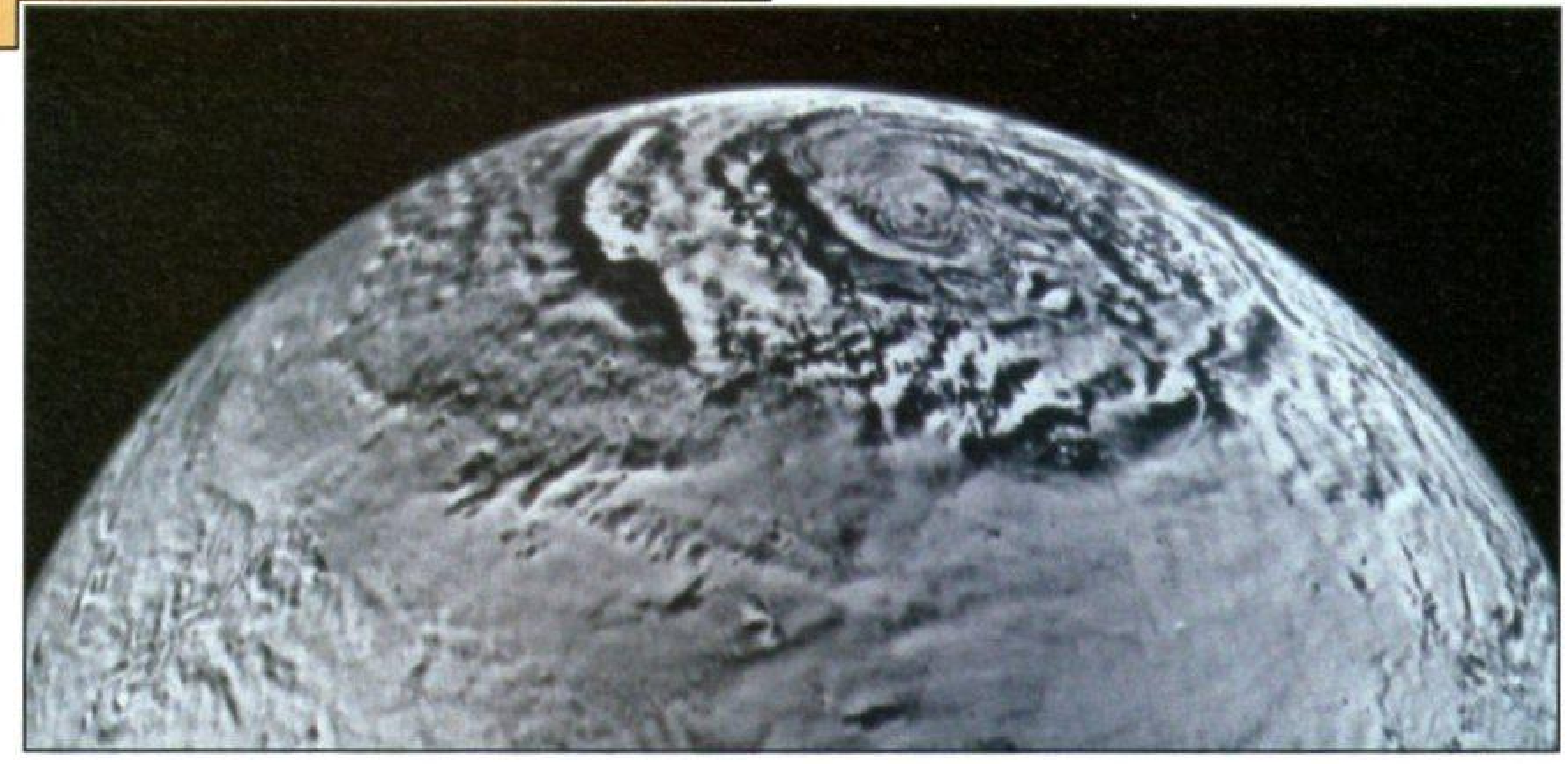
Último de los planetas telúricos, ha ejercido su fascinación especialmente a través de la comparación con nuestro propio mundo, dando lugar a conjeturas en torno a la posibilidad de que albergara vida. Sin embargo, a lo largo de los dos últimos siglos se ha convertido en objeto de una investigación científica seria. Los estudios más significativos son aquellos revelados por las misiones espaciales, los cuales contradicen las conclusiones obtenidas anteriormente por medio de la observación terrestre.

El diámetro de Marte es apenas superior a la mitad del de la Tierra, y su densidad media es aproximadamente un 30 por ciento inferior al de ésta. Dado que la mayor parte de la masa de los planetas telúricos se concentra en el núcleo, el de Marte no puede ser demasiado grande. Los astrónomos se inclinan por un modelo interior similar del resto de los planetas telúricos, esto es, un núcleo de hierro y compuestos férreos dotado de un núcleo de unos 3.000 km. Sobre el núcleo se extiende un manto de silicatos de unos 1.800 km de espesor rodeado por una corteza de apenas 100 km de grosor.

Marte tarda 686,98 días —casi 1,9 años terrestres— en completar su órbita alrededor del Sol, y gira sobre su eje a un ritmo de 24,623 horas, por lo que su día es algo más largo que el terrestre. Dado que su órbita es cinco veces y media más excéntrica que la de la Tierra, Marte sufre cambios más evidentes a lo largo de sus estaciones.

En Marte, las estaciones son similares a las de la Tierra. Ello se debe a la inclinación de su eje de rotación, apenas superior a los 25 grados (la de la





***Valles Marineris,** el gran cañón marciano que parece demostrar la existencia de antiguas erosiones debidas a la acción del agua, aparece aquí captado por las cámaras situadas a bordo del* Viking 1 *durante su visita a Marte en 1976. Se utilizó un mosaico de imágenes del* Mariner 9 *para crear este primer plano (derecha) del casquete polar septentrional en 1971. El dibujo en espiral se debe a la erosión del viento.*





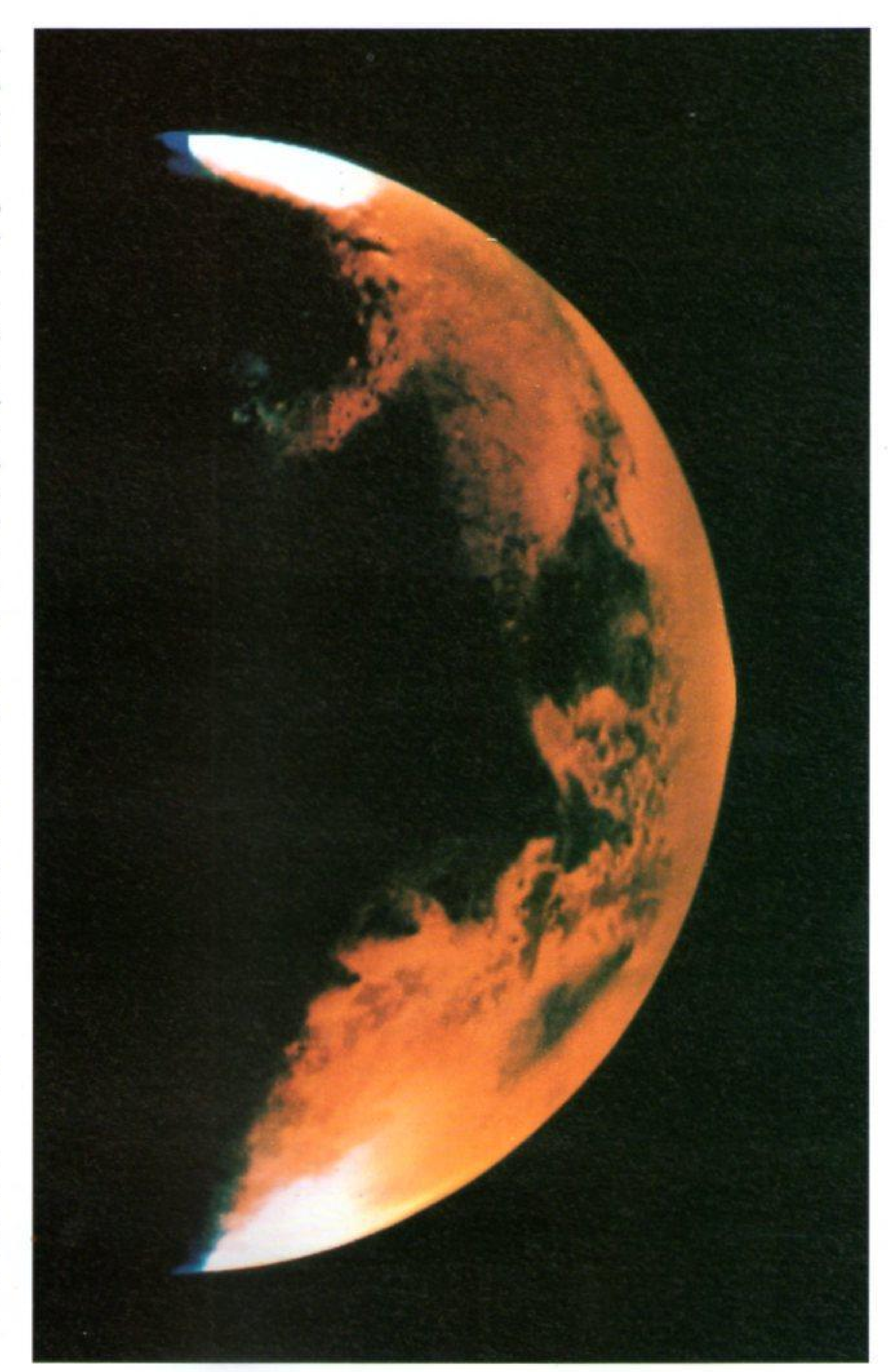
Tierra es de 23,4 grados). La excentricidad de su órbita implica, no obstante, que sus estaciones son más irregulares que las de la Tierra: en el hemisferio norte de Marte la primera dura 194 días, es decir, 51 días más que el otoño.

Los cambios de estación de Marte han llamado la atención de los astrónomos ya desde primeros de siglo, pues muestran dos efectos notables fácilmente distinguibles desde la Tierra. El primero consiste en una decoloración de su superficie rojiza: las zonas menos rojas —a veces incluso grises o verdes— comienzan a extenderse con la llegada de la primavera marciana. El segundo efecto es que durante la primavera ambos hemisferios muestran una contracción de sus casquetes polares. Los primeros astrónomos relacionaban ambos fenómenos entre sí, y llegó a aceptarse generalmente que la decoloración se debía a la existencia de zonas de vegetación que se extendían al ser regadas por el agua procedente del derretimiento de los casquetes.

Marte posee una atmósfera formada fundamentalmente por dióxido de carbono (95 por ciento), a lo que hay que añadir un 2,7 por ciento de nitrógeno y un 1,6 por ciento de argón. El oxígeno se halla presente en un 1,3 por ciento, y el vapor de agua apenas alcanza el 0,3 por ciento de su composición. Sin embargo, la atmósfera marciana es mucho más delgada que la de la Tierra. Al nivel del suelo, ejerce una presión equivalente a tan sólo un 0,7 por ciento de la de la atmósfera terrestre. Asimismo, dado que el dióxido de carbono constituye un eficaz emisor de radiaciones de calor (infrarrojas), las temperaturas cercanas a la superficie pueden descender durante la noche hasta por debajo de los –53 °C, y hasta –133 °C en los polos.

Debido a su carencia de océanos, la superficie de Marte reacciona rápidamente ante cualquier cambio de temperatura. Las diferencias de temperatura ocasionan potentes vientos que siguen el curso del aire calentado por el Sol. Estos vientos, similares a mareas, pueden alcanzar a ras de la superficie velocidades de entre 45 y 90 metros por segundo.

A tales velocidades, los vientos impulsan los granos de arenas sobre el terreno y levantan nubes de polvo hacia la atmósfera. Los granos de polvo son tan diminutos —su diámetro es de apenas una centésima de milímetro— que permanecen suspendidos en la atmósfera durante meses. Estas tormentas de arena son fundamentalmente locales, pero dos veces por año marciano las alteraciones se vuelven tan generalizadas que grandes zonas pueden hacerse invisibles desde la Tierra.



Los característicos casquetes blancos *situados en los polos norte y sur de Marte se componen de una mezcla de hielo y dióxido de carbono en estado sólido.*

En buenas condiciones de visibilidad es posible observar desde la Tierra largas franjas rectas sobre la superficie marciana. El astrónomo Giovanni Schiaparelli las detectó e incluso trazó mapas de su recorrido. Las denominó *canali,* pero algunos astrónomos relacionaron la palabra con el concepto de canales artificiales, en parte porque semejante red de líneas rectas parecía haber sido construida artificialmente.

La noción de un sistema «no natural» de canales condujo a la deducción de que debían existir criaturas inteligentes sobre la superficie de Marte. Éstas habrían sobrevivido, en parte, del cultivo de vegetales, lo que parecía confirmado por las zonas grisáceo-verdosas de la superficie. El principal protagonista de esta teoría fue el astrónomo Percival Lowell, quien cartografió hábilmente los canales durante la década de 1890 desde su institución personal, el observatorio Lowell de Flagstaff, Arizona.

Hasta la llegada de las sondas lanzadas en los años sesenta y setenta, la mayor parte de los astrónomos aceptaba la existencia de largas franjas longitudinales sobre Marte y no tenían inconveniente en denominarlas «canales», si bien nadie pensó que constituyeran una prueba fehaciente de la existencia de marcianos. Dicha opinión generalizada no cambió hasta 1965, cuando la nave *Mariner 4* se acercó lo suficiente como para obtener primeros planos de la superficie marciana. Si bien carecían de demasiado detalle, revelaron de modo concluyente que no existían tales canales; Marte, por el contrario, era un territorio desolado y salpicado de cráteres más parecido a la Luna que a la Tierra.

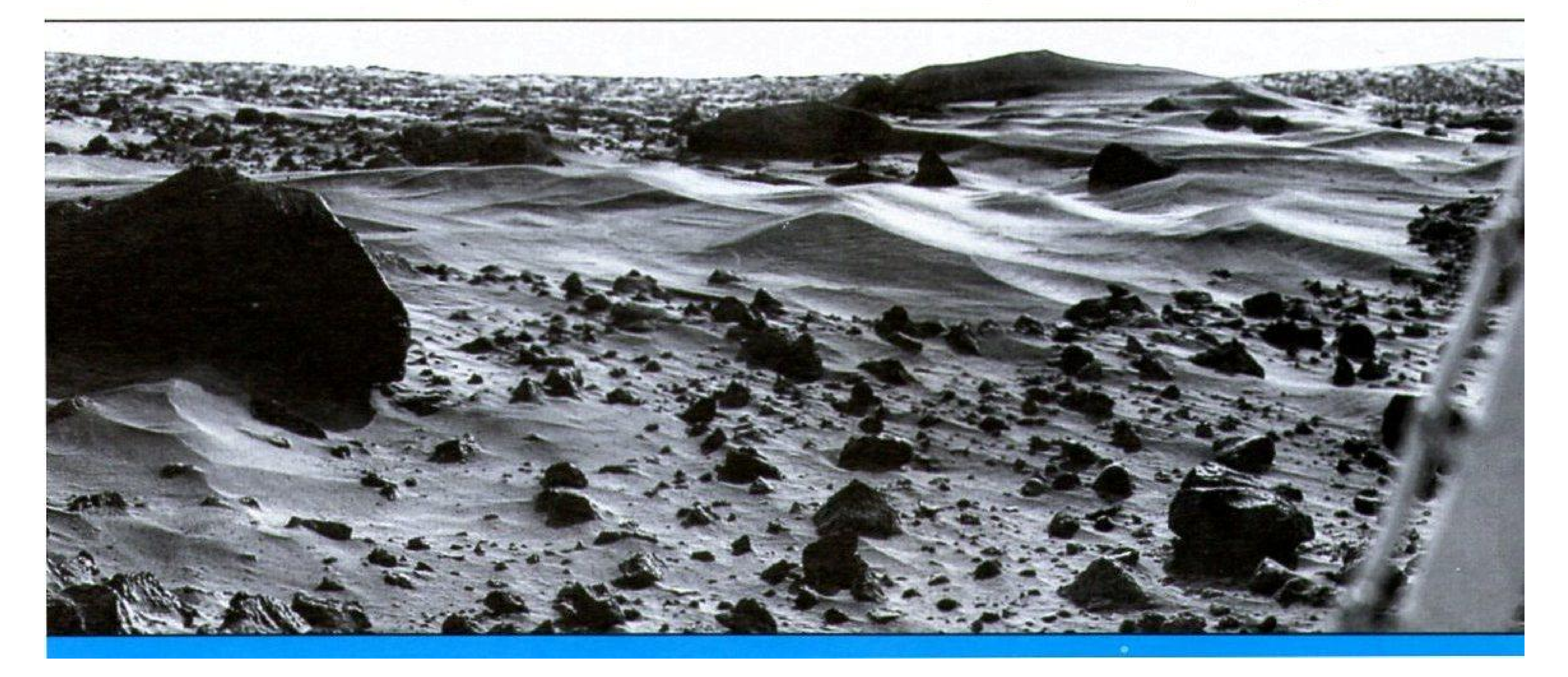
Posteriores sondas *Mariner* suministraron pruebas visuales similares, pero en 1971, cuando el *Mariner 9* logró fotografiar zonas de tan sólo 100 metros de diámetro, la superficie marciana no sólo mostraba impactos de cráteres, sino además amplios cañones, volcanes y lechos fluviales desecados. Cinco años más tarde, dos naves *Viking* aterrizaron en Marte, donde tomaron primeros planos de las rocas marcianas y realizaron análisis químicos de su suelo.

El *Viking 1* aterrizó en una zona relativamente poblada de cráteres situada en la Chryse Planitia. Las fotografías mostraban numerosas rocas diseminadas por las inmediaciones y varios cráteres en el horizonte, cráteres que alcanzaban los 600 metros de diámetro. La superficie era «arenosa».

La segunda nave, el *Viking 2*, aterrizó a 8.846 kilómetros al noreste, sobre una superficie plana atravesada por fracturas y grietas. A unos 200 kilómetros al sur aparecía un enorme cráter hoy bautizado con el nombre de Mie, dotado de un diámetro de unos 100 km. Parece ser que el *Viking 2* llegó a posarse sobre la pared del cráter. Las rocas cercanas a los lugares de aterrizaje de ambas naves aparecen salpicadas de orificios, lo que podría indicar las vías de escape de los gases que contuvieran en otro tiempo o el resultado de la erosión de las partículas de polvo arrastradas por el viento.

A corta distancia, la superficie de Marte es roja. Dos tercios de las partículas de arena que lo cubren se componen de sílice y hierro, y existe además una alta concentración de azufre (más de 100 veces de lo que es posible hallar en la Tierra). La coloración rojiza se debe sencillamente al óxido (óxido de hierro acompañado de otras impurezas tales como el sulfuro de hierro). Otras pruebas obtenidas revelan que la superficie es una «arcilla rica en hierro». La decoloración que en tiempos se atribuía a la presencia de vegetación ha demostrado no deberse sino a una reacción química producida sobre la superficie rocosa. Asimismo, ambos *Vikings* han mostrado que el cielo marciano es rosado en lugar de azul como consecuencia de las finas partículas de óxido de hierro que flotan en el aire.

Las secciones orbitales de las naves *Viking* circunvalaron el planeta y cartografiaron su superficie con un detalle que revelaba zonas de tan sólo 150 metros de diámetro, llegando incluso a mostrar lugares previamente seleccionados con una resolución de 8 metros. Igualmente, los *Vikings* revelaron otros rasgos notables, incluyendo el gigantesco volcán



Un campo de dunas marciano *fotografiado a la luz del amanecer por el Viking 1 en 1976. Apreciamos en él notables similitudes con los desiertos terrestres. Las afiladas crestas de las dunas y los pequeños depósitos rocosos situados a corta distancia de ellas han sido creados por el viento. La gran roca que vemos a la izquierda, llamada «Big Joe», posee unos dos metros de longitud. La franja que se distingue en el centro de la imagen es la pluma meteorológica de la nave espacial, un brazo extensible en el que se hallan instalados los instrumentos climatológicos.*

denominado Olympus Mons, así como los Valles Marineris, un sistema de grandes cañones situado en las regiones ecuatoriales que se extiende a lo largo de más de 5.000 kilómetros y posee una profundidad de 7.000 metros.

El dato más curioso descubierto por los *Vikings* es la confirmación de que la superficie de Marte muestra rasgos que parecen canales acuíferos desecados. Hoy día, no existe agua en estado líquido sobre la superficie de Marte, pero los canales descubiertos parecen confirmar la idea de que en los primeros tiempos del sistema solar, en la época en que el Sol se estaba desarrollando, el planeta debió de soportar un breve período de intensa radiación. De ser así, la atmósfera planetaria original —acaso rica en vapor de agua y dióxido de carbono— podría haber sido barrida de la superficie, permitiendo así la existencia de agua líquida sobre el planeta.

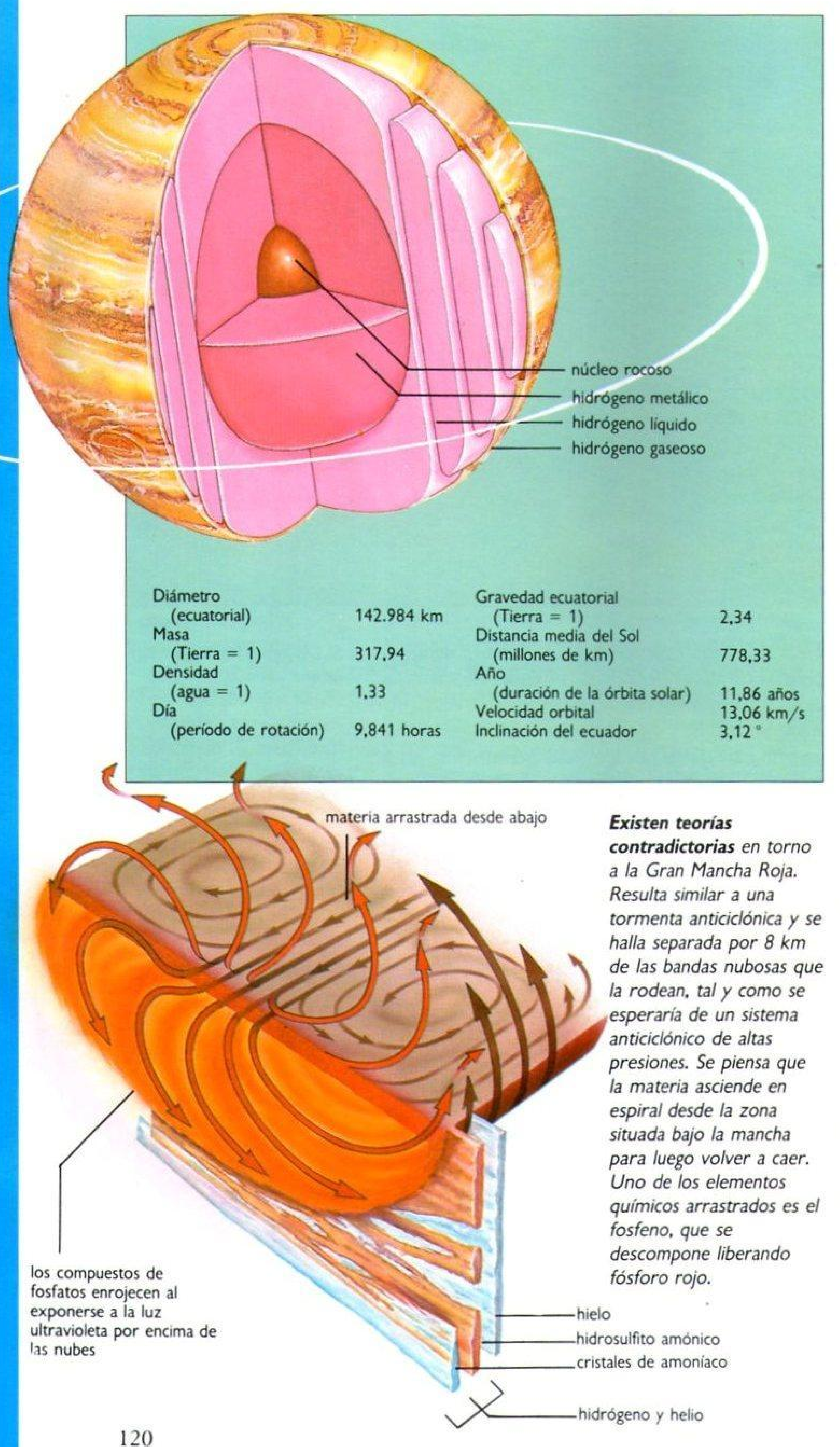
Otra teoría es que los canales pudieron haberse formado por el derretimiento de los hielos a lo largo de anteriores períodos de intensa actividad volcánica. Lo que, sin embargo, parece indudable es que no hay pruebas que demuestren la existencia de vida sobre Marte.

***El Olympus Mons** (arriba) es una vasta tapadera de volcán formada por sucesivas erupciones de lava. Posee un diámetro de 600 km y una altura superior a los 24.000 m. La mayor estructura de este tipo existente en la Tierra es el Mauna Kea de Hawai, dotado de una altura de 9,7 km sobre el lecho marino.*



JÚPITER

• *El rey de los planetas*



Diámetro (ecuatorial)	142.984 km	Gravedad ecuatorial (Tierra = 1)	2,34
Masa (Tierra = 1)	317,94	Distancia media del Sol (millones de km)	778,33
Densidad (agua = 1)	1,33	Año (duración de la órbita solar)	11,86 años
Día (período de rotación)	9,841 horas	Velocidad orbital	13,06 km/s
		Inclinación del ecuador	3,12 °

***Existen teorías contradictorias** en torno a la Gran Mancha Roja. Resulta similar a una tormenta anticiclónica y se halla separada por 8 km de las bandas nubosas que la rodean, tal y como se esperaría de un sistema anticiclónico de altas presiones. Se piensa que la materia asciende en espiral desde la zona situada bajo la mancha para luego volver a caer. Uno de los elementos químicos arrastrados es el fosfeno, que se descompone liberando fósforo rojo.*

Júpiter es el más cercano al Sol de los gigantes gaseosos, esto es, enormes planetas rodeados por espesas y densas atmósferas de miles de kilómetros de espesor. Estos planetas constituyen la mayor proporción de masa planetaria orbital del sistema solar, del cual Júpiter representa por sí solo más del 71 por ciento.

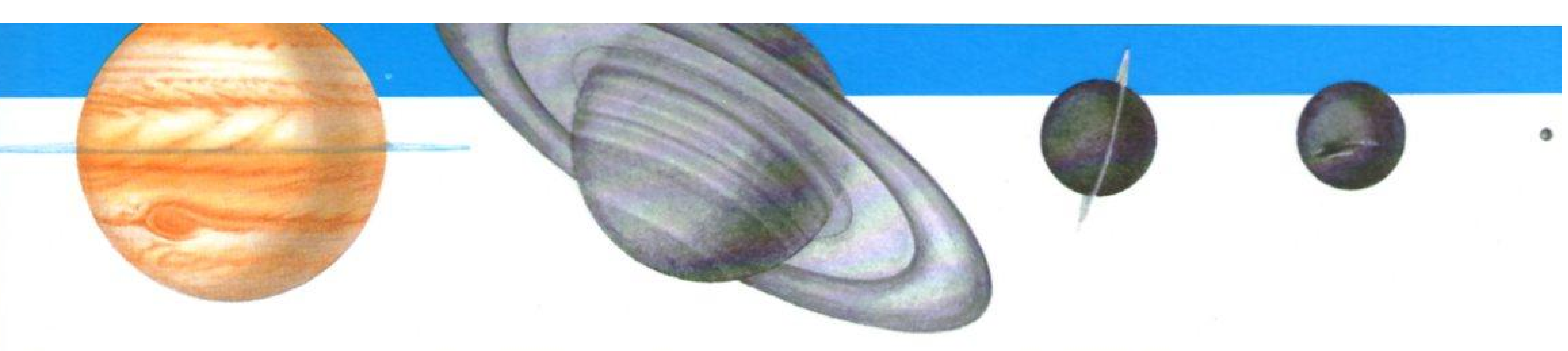
Esencialmente, Júpiter es una vasta bola de gas dotada de un denso núcleo central cuyo diámetro alcanza unos 30.000 km y una temperatura de entre 20.000 y 30.000 K en el centro. Según los cálculos realizados, el núcleo parece compuesto fundamentalmente de hierro y silicatos mezclados con hielo, amoníaco y metano, estos últimos convertidos en metal por la inmensa presión de la materia que los rodea. La presión en la superficie del núcleo es 45 millones de veces superior a la de la presión atmosférica terrestre, equivalente a 450 millones de kilogramos por centímetro cuadrado.

En el exterior del núcleo central existe una zona compuesta de hidrógeno y sometida asimismo a una enorme presión (en este caso, 2 millones de veces superior a la terrestre o de 2 millones de kg por centímetro cuadrado). Bajo semejante presión, el hidrógeno se metaliza, y su densidad es cuatro veces mayor de la que posee en estado gaseoso. Este núcleo exterior se extiende a lo largo de unos 30.000 km por encima del núcleo central.

Por encima del hidrógeno metálico existe otra zona de hidrógeno que, si bien se halla también sometida a una enorme presión, no ha llegado a metalizarse, sino que adopta la forma de hidrógeno molecular en estado líquido. Dicha capa posee un grosor de 25.000 km. Sobre ella se extiende una atmósfera gaseosa rica en hidrógeno de 1.000 km de espesor. Dicha capa es la que distinguimos desde la Tierra y la que ha podido ser fotografiada de cerca por las naves espaciales *Voyager*.

Incluso visto a través de un telescopio relativamente pequeño, Júpiter, con su atmósfera de franjas y sus cuatro brillantes satélites (págs. 138-139), constituye un hermoso espectáculo. Todo lo que puede verse de él es un disco aplastado y oblicuo que parece más ancho en el ecuador que en los polos. Esta forma se debe sobre todo a su naturaleza fundamentalmente fluida, así como a su veloz rotación axial; un día joviano no dura 24 horas, sino tan sólo 9,8.

La atmósfera joviana observable no sólo muestra un dibujo de franjas, sino que presenta numerosos rasgos de la existencia de un poderoso recorrido circulatorio en las regiones gaseosas exteriores. La cir-



culación es más rápida en las zonas ecuatoriales y más lenta en las proximidades de los polos. Debido a sus diferentes velocidades de rotación, la atmósfera presenta unos rasgos constantemente cambiantes. En algunas ocasiones, aparece adornada por la presencia de la Gran Mancha Roja, observada a través de los telescopios terrestres desde 1650. Adicionalmente, pueden también observarse sus cuatro principales satélites a medida que giran en torno al planeta, temporalmente eclipsados por éste para luego atravesar su superficie nubosa, sobre la que arrojan sus sombras.

No obstante, si Júpiter resulta ya espectacular de por sí a través de los telescopios terrestres, aún más llamativo es su aspecto tal y como lo mostraron las naves espaciales *Voyager 1* y *Voyager 2* en marzo y julio de 1979. Gracias a dichas observaciones, sabemos hoy que las nubes de su superficie se hallan compuestas en un 90 por ciento por hidrógeno. El 10 por ciento restante es casi exclusivamente helio, si bien existen vestigios de los siguientes elementos, en orden decreciente: amoníaco, metano y vapor de agua.

La continua circulación de las franjas nubosas distribuye eficazmente el calor procedente del interior del planeta. La velocidad de los vientos, medida a partir de la masa rotatoria de la atmósfera en dirección este, oscila entre la de los vientos orientales, que viajan a velocidades de hasta 120 metros por segundo, y la de los occidentales (más lentos que la masa en rotación), que alcanzan más de 50 metros por segundo.

Por medio de cámaras fotográficas y detectores de infrarrojos, la nave *Voyager* ha logrado traspasar en parte la capa nubosa exterior y la atmósfera que la rodea. Justamente por encima de las nubes, allí donde la presión es equivalente a cinco veces la de la Tierra al nivel del mar, aparecen más nubes parduzcas formadas, según se cree, por vapor de agua y otros compuestos aún desconocidos, probablemente azufre. En esta zona, la temperatura es de 7 °C. A aproximadamente 30 km de altura por encima de este punto, existen nubes rojo-parduzcas compuestas por sulfuro de hidrógeno amonio y por otras sustancias no identificadas. Aquí, la temperatura desciende hasta –73 °C.

A unos 65 km por encima de las nubes parduzcas se observan nubes cirrosas de amoníaco que flo-

***La Gran Mancha Roja** es el rasgo principal del hemisferio sur de Júpiter. Esta imagen resaltada obtenida por el* Voyager 1 *muestra claramente la naturaleza giratoria de la mancha y revela pequeños detalles hinchados de su constitución. La mancha gira en sentido opuesto a las agujas del reloj a lo largo de un ciclo de unos 6 días. Hoy día, posee una longitud de unos 26.200 km y una anchura de 13.800 km.*

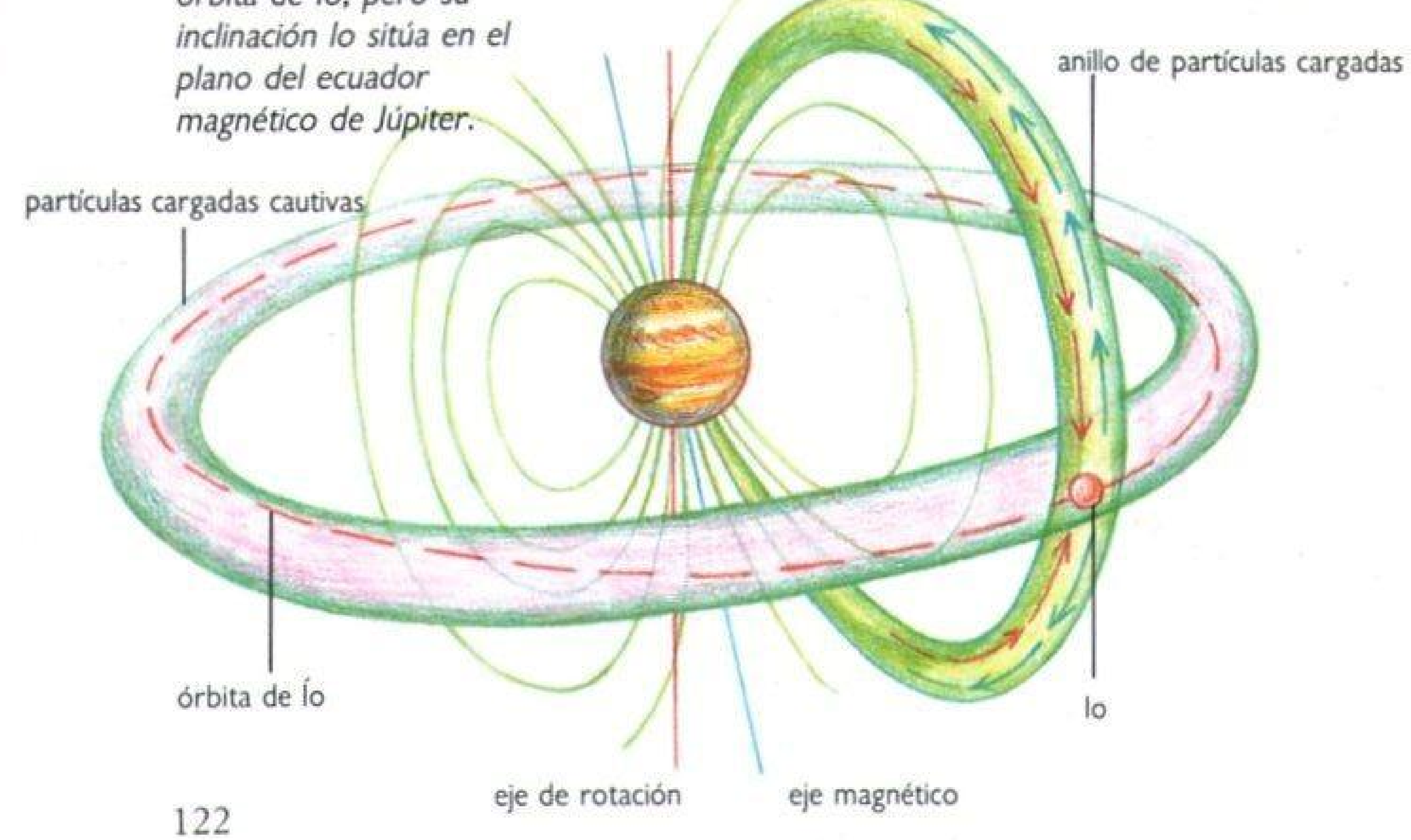
tan a una temperatura de –133 °C. No obstante, a 90 km de altitud —en la tropopausa joviana— la temperatura comienza de nuevo a elevarse, si bien incluso a 150 km de altura nunca alcanza un nivel superior a los –113 °C, pues Júpiter se halla a 780 millones de kilómetros de la cálida radiación solar.

Los científicos opinan que bajo las nubes, en el interior de la capa de hidrógeno molecular, podría haber una serie de envolturas cilíndricas concéntricas. Cada una de ellas tendría su propio período de rotación, lo que daría lugar a las corrientes de viento observadas en las diferentes latitudes de la capa superior de nubes.

La gran mancha roja no es más que una de tantas manchas ovaladas de larga duración de la nubosa atmósfera joviana, capaces de persistir durante meses o incluso años. Sin embargo, dado que resulta visible desde hace más de 340 años, parece poseer una longevidad excepcional. Adicionalmente, resulta poco corriente el hecho de que se eleve a unos 8 km por encima de la masa nubosa que la rodea. Igualmente excepcional es su tamaño, que llega a cubrir 10 grados de latitud joviana, lo que la convierte en casi tan grande como la propia Tierra.

Los óvalos —la gran mancha roja incluida— se mantienen en la misma latitud, si bien cambian de longitud, por lo que parecen girar entre diferentes capas de nubes de alta velocidad. Los primeros planos de la gran mancha roja obtenidos por el *Voyager* proporcionan detalles de hasta 30 kilómetros de diámetro y revelan que parece tratarse de un ciclón dotado de un complicado sistema de movimientos atmosféricos giratorios. Los meteorólogos planetarios aún mantienen su incertidumbre respecto a las causas de estos rasgos atmosféricos en general y de la gran mancha roja en particular.

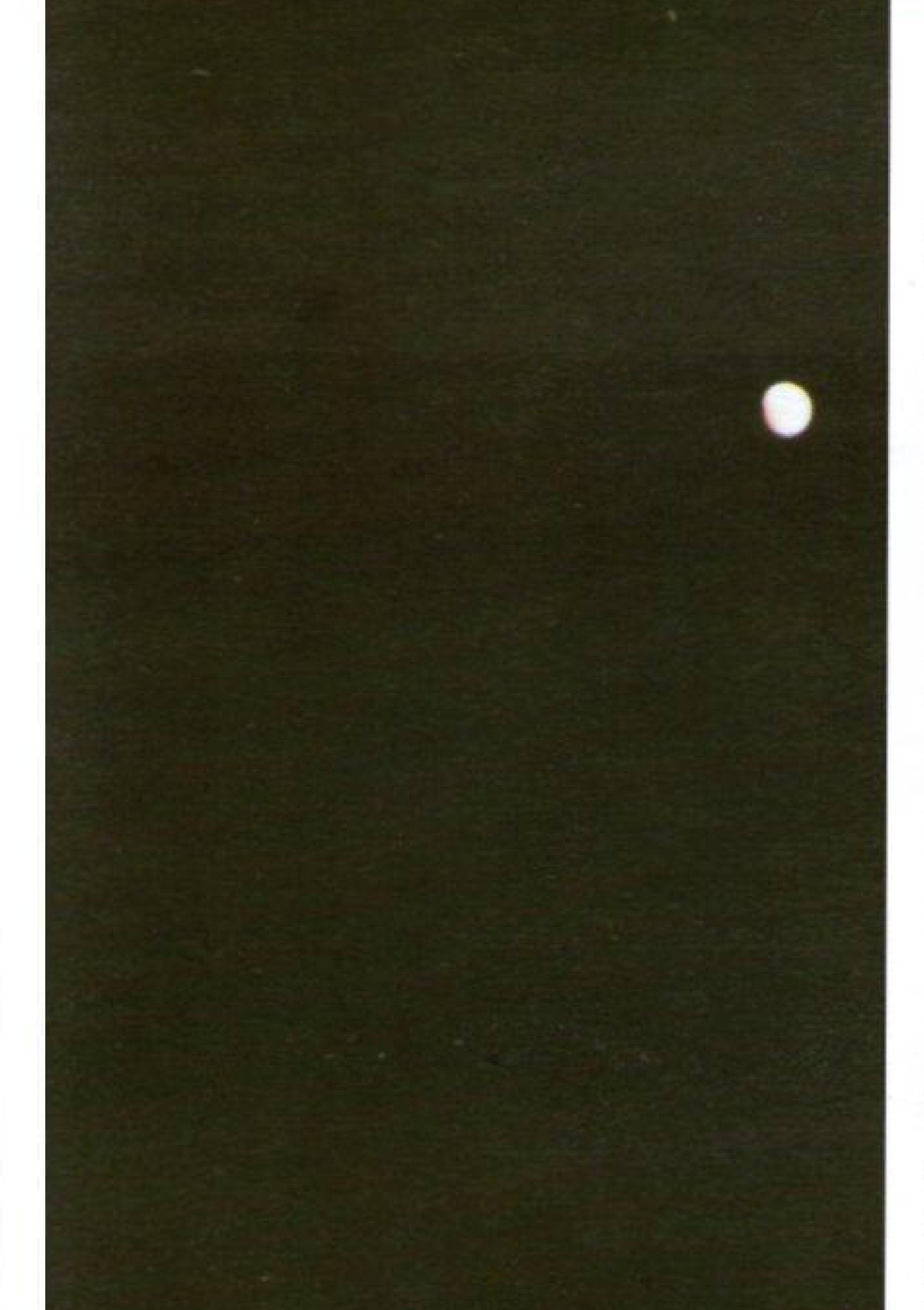
Júpiter emite ondas de radio, y posee un enorme y poderoso campo magnético. Al igual que en

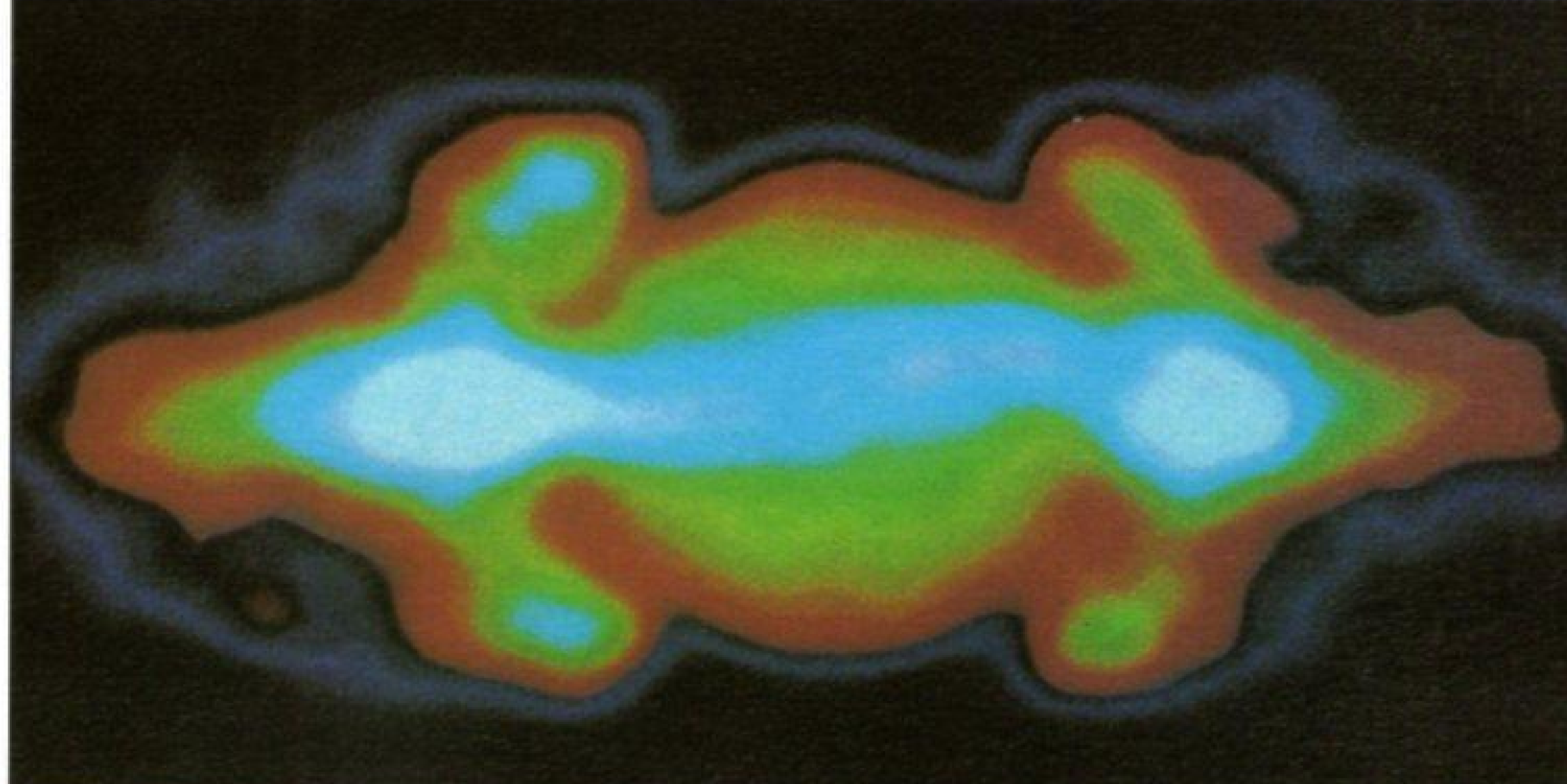


En torno a Júpiter se observa *un grueso cinturón de plasma o toro (abajo). Consiste en partículas dotadas de carga eléctrica resultantes de la actividad volcánica del satélite Io. Estas son atrapadas por las líneas de fuera del campo magnético de Júpiter. El toro posee la misma forma y tamaño de la órbita de Ío, pero su inclinación lo sitúa en el plano del ecuador magnético de Júpiter.*



La compleja naturaleza de los cinturones de nubes *de Júpiter aparece ilustrada por la foto tomada por un Voyager 1 (izquierda) desde una distancia de 28,4 millones de km del planeta. También se ven la luna interior Ío y el satélite Ganímedes.*





Los cinturones de radiación de Júpiter *en una imagen de colores artificiales obtenida por el radiotelescopio VLA de Nuevo México. El fuerte campo magnético de Júpiter atrapa los electrones en cinturones similares a los cinturones terrestres de Van Allen. Dichos electrones emiten radiación sincrotrónica en radiofrecuencia. La presente imagen fue tomada en una longitud de onda de 21 cm.*

el caso de la Tierra, dicho campo forma un bipolo similar al de una barra imantada. Los polos magnéticos del planeta muestran una inclinación de 11 grados con respecto al eje de rotación, a lo que hay que añadir que el eje magnético posee una desviación del centro del planeta equivalente a una décima parte de su radio, esto es unos 71.400 km. Como resultado, el campo magnético en la superficie de las nubes no es igual en todos los puntos, sino que difiere especialmente entre los hemisferios norte y sur.

Debido a su campo magnético, Júpiter posee una magnetosfera que se extiende hacia el espacio en torno al planeta. Aunque se trata de un campo bipolar, ésta es distinta a la de la Tierra. A ello contribuyen dos factores principales. En primer lugar, el campo magnético de Júpiter es unas 100 veces mayor que el de la Tierra. Por otra parte, el efecto que sobre él ejerce el viento solar es unas 25 veces menor debido a la lejanía de Júpiter del astro.

En la cara soleada de Júpiter, la magnetosfera se extiende hasta unos 2 millones de kilómetros por encima del planeta, pero en la cara opuesta es incluso mayor. Su intensa región central posee un diámetro de 4 millones de km. Así, la magnetosfera se extiende a una distancia incluso superior y parece estirada en dirección opuesta a la del Sol por el «empuje» del viento solar. Este inmenso estiramiento indica que es posible que la cola de la magnetosfera joviana se extendiera hasta la órbita de Saturno, alcanzando una distancia de más de 600 millones de km. También en la cara iluminada por el Sol observamos cierto estiramiento de la magnetosfera, si bien en ningún caso comparable al anterior.

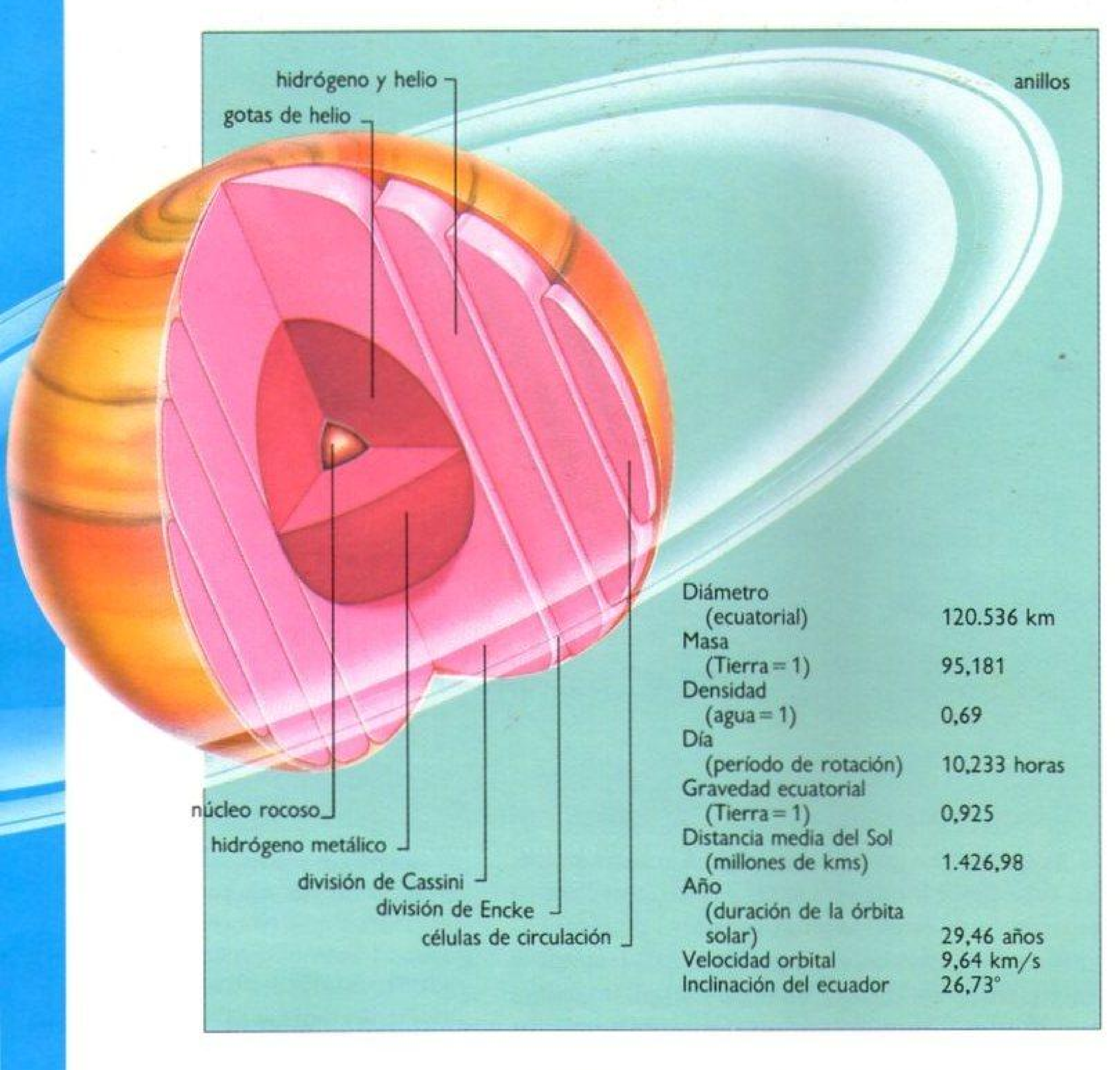
El viento solar y las partículas electrificadas de la magnetosfera joviana dan lugar a auroras boreales similares a las de la Tierra, y el *Voyager 1* captó fenómenos de este tipo a su paso por el planeta. Dichos espectáculos tienen lugar en toda la superficie de Júpiter y no sólo en las regiones polares, como sucede en la Tierra, debido posiblemente a los electrones de baja velocidad que han logrado escapar lo suficiente como para reaccionar con la ionosfera.

Júpiter emite más radiación de la que recibe del Sol. Ello se debe al calentamiento producido por el encogimiento del núcleo del planeta —proceso que puede no haber concluido aún— y al calentamiento radioactivo. Debido a la radiación térmica procedente del núcleo, Júpiter emite en ondas de radio. Algunas de estas ondas son centimétricas como resultado del movimiento de las partículas electrificadas en la magnetosfera; otras son más largas: entre 10 metros y 3 kilómetros. Estas transmisiones resultan alteradas por uno de los satélites más cercanos a Júpiter, el fogoso Ío (págs. 138-139), que pasa a menos de 350.000 km de las capas superiores de nubes, esto es, lo bastante cerca como para afectar a la magnetosfera joviana.

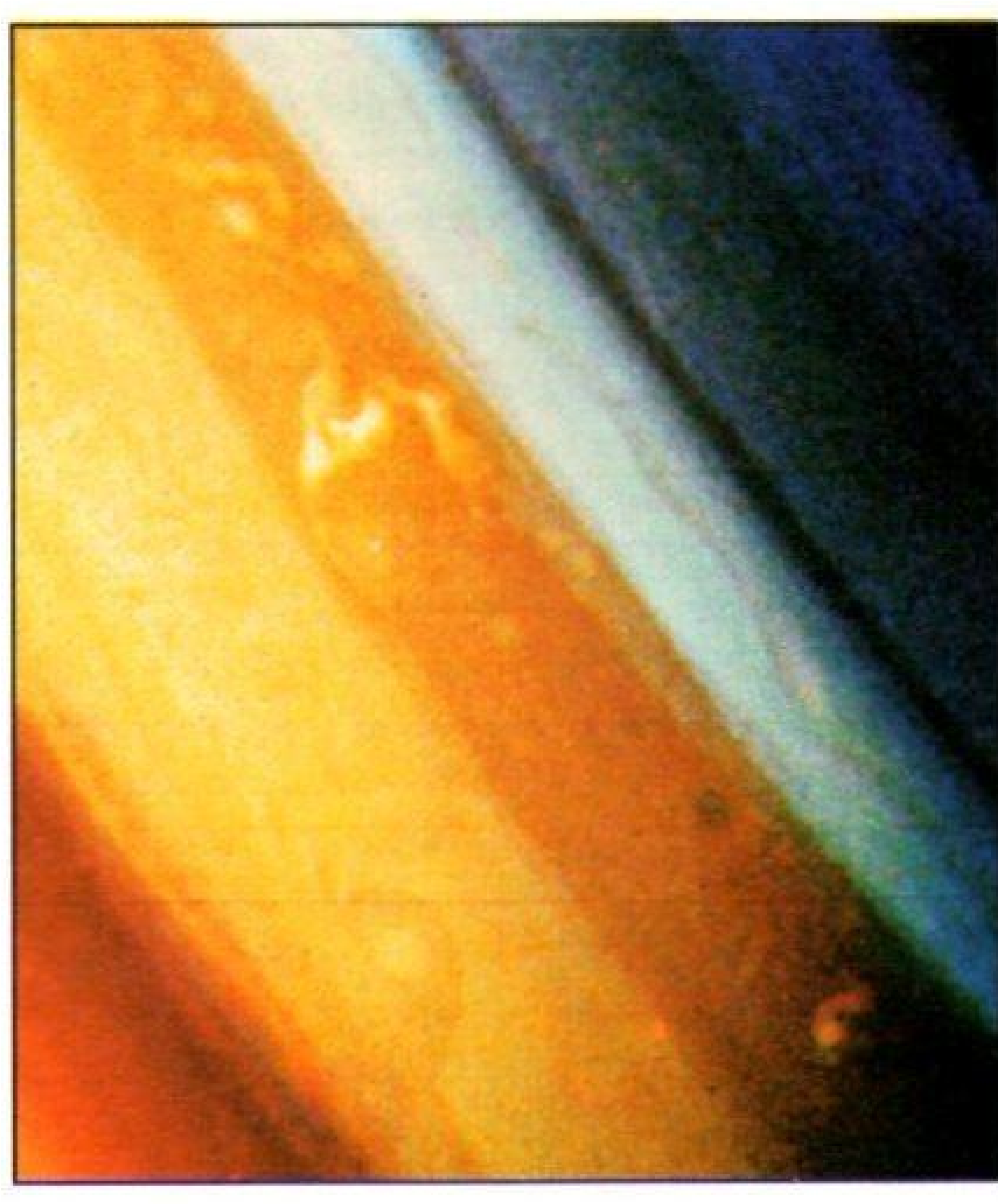
Júpiter cuenta con un sistema de delgados anillos. El borde exterior del anillo principal se halla a una distancia de 50.000 km de la superficie de nubes, y aparece acompañado de otro anillo sumamente tenue que se extiende aún a mayor distancia.

SATURNO

• *El mundo anillado*



Diámetro (ecuatorial)	120.536 km
Masa (Tierra = 1)	95,181
Densidad (agua = 1)	0,69
Día (período de rotación)	10,233 horas
Gravedad ecuatorial (Tierra = 1)	0,925
Distancia media del Sol (millones de kms)	1.426,98
Año (duración de la órbita solar)	29,46 años
Velocidad orbital	9,64 km/s
Inclinación del ecuador	26,73°



Los ragos visibles de Saturno *consisten en bandas y dibujos nubosos tales como óvalos, torbellinos y núcleos de interacción. Esta imagen coloreada del hemisferio septentrional del planeta, tomada por el* Voyager 1 *en 1980 a una distancia de 9 millones de kilómetros, muestra una nube convectiva aislada en la zona de color marrón claro y muy delgada onda longitudinal en el cinturón azul. Los detalles más pequeños que pueden discernirse poseen un diámetro de 175 km.*

De todos los planetas situados en órbita en torno al Sol, Saturno es el más espectacular debido a su sistema de anillos. No obstante, Saturno no es el único que cuenta con ellos: Júpiter, Urano y Neptuno también los poseen, si bien ninguno es tan extenso y variado como el del primero, único que puede contemplarse desde la Tierra a través del telescopio.

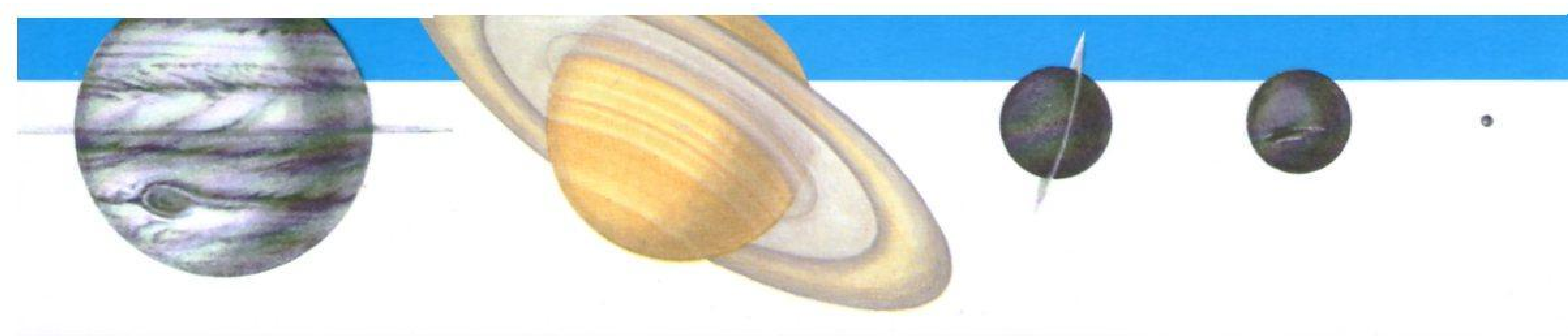
Aunque de menor tamaño que Júpiter, Saturno es otro de los gigantes gaseosos, y representa el 21 por ciento de la masa de todos los planetas. No obstante, es menos denso que Júpiter: mientras que la densidad media de Júpiter es de 1,33 veces la del agua, la de Saturno es tan sólo de 0,69. Ello significa que Saturno flotaría si pudiera ser depositado en un recipiente de agua lo bastante grande.

Los cálculos realizados hasta el momento indican que Saturno posee un núcleo central de unos 25.000 km de diámetro compuesto por silicatos, minerales y diversos tipos de hielo. La temperatura del mismo es de unos 14.000 K, y la presión es 10 millones de veces mayor que la presión atmosférica terrestre.

Sobre el núcleo se extiende un caparazón de hidrógeno metálico de unos 11.460 km de longitud, menos de una décima parte del espesor de la región de hidrógeno metálico de Júpiter. A continuación, existe una capa de gotas de helio de unos 4.200 km de grosor rodeada finalmente por el resto de material del planeta, que alcanza un espesor de 29.000 km. Compuesta por un 93 por ciento de hidrógeno y un 7 por ciento de helio, se trata de una capa ligera que forma la cubierta exterior de Saturno visible desde la Tierra y fotografiada por las naves espaciales *Voyager*.

Al igual que Júpiter, Saturno está achatado por los polos, si bien su ligereza y sus 10 horas de rotación hacen que su grado de achatamiento sea superior al del primero en más del 50 por ciento. Saturno es, de hecho, el más achatado de todos los planetas. La superficie que observamos se halla atravesada por bandas de nubes que, no obstante, resultan más curvadas que las de su hermano mayor.

El diseño de las nubes resulta, sin embargo, similar, con chorros de nubes rápidas que dan lugar a remolinos e incluso con una mancha rojiza, ovalada y permanente, situada a 55 grados de latitud sur. Dicha mancha es parecida a la Gran Mancha Roja de Júpiter, si bien resulta mucho más pequeña, pues su longitud apenas alcanza los 6.000 km



en dirección este-oeste, en lugar de los 26.200 de la Gran Mancha Roja. Saturno posee asimismo otros óvalos en distintas latitudes, fundamentalmente en el hemisferio norte. Cada vez que las manchas y los óvalos coinciden, giran uno en torno al otro en lugar de mezclarse tal y como sucede en Júpiter.

Saturno posee asimismo una oscura línea ondulada, característica y permanente que recorre su capa nubosa. Se halla situada a 45 grados de latitud norte y se extiende a lo largo de unos 5.000 km en dirección este-oeste.

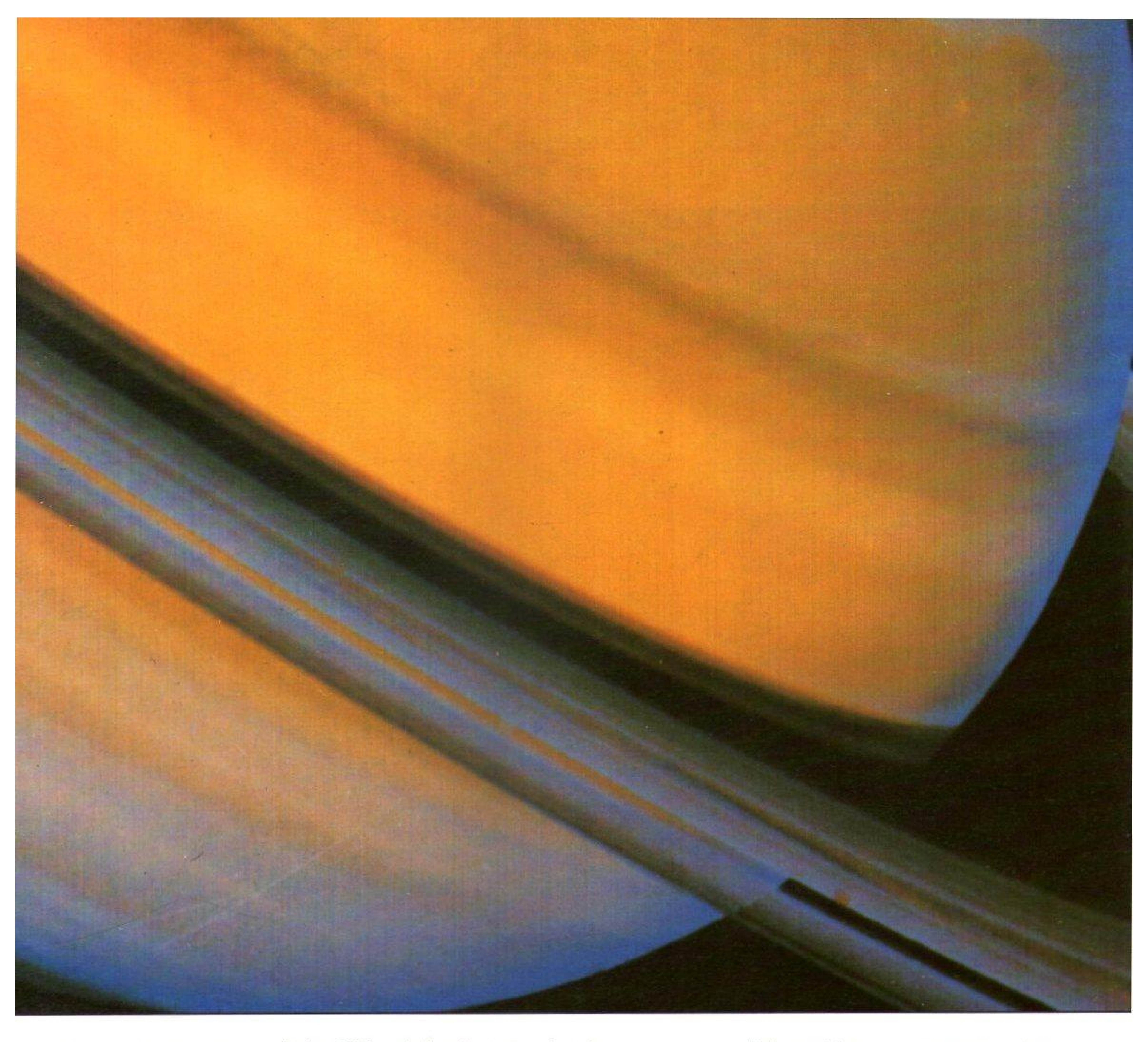
Aún quedan numerosas incógnitas por despejar en lo que se refiere al comportamiento de la capa nubosa de Saturno y la atmósfera que la recubre, si bien hoy en día se sabe que, al igual que sucede en Júpiter, las bandas de nubes circulan a altas velocidades, las cuales alcanzan en las proximidades del ecuador de Saturno los 480 metros por segundo. No obstante, en las cercanías de los polos, estas velocidades se reducen a cero, lo que indica que simplemente se mantienen acordes con la rotación axial del planeta.

Por encima de la capa de nubes, la atmósfera de Saturno se expande hacia el exterior, formando nubes de amoníaco a una altura aproximada de 30 km. Las naves *Voyager* han revelado que la atmósfera superior del planeta posee asimismo algunas nubes coloreadas, pero aún queda por determinar su altura.

Al igual que Júpiter, Saturno emite más radiación que la que recibe del Sol. En este caso, emite 1,76 veces más, como resultado de un calor o energía interna causado, según se piensa, por la contracción del núcleo del astro o por las gotas de helio al condensarse y caer en su interior.

Saturno posee un campo magnético generado por las corrientes eléctricas en el hidrógeno metálico del núcleo. La magnetosfera del campo —muy similar a la de Júpiter, si bien menos extensa— se expande hacia el espacio en dirección opuesta a la del Sol, aunque formando cierto abultamiento ha-

Saturno y su espectacular sistema de anillos *vistos por las cámaras del* Voyager 2. *La imagen fue tomada cuatro días y medio después de que la nave realizara su mayor acercamiento al planeta. Desde la Tierra resulta imposible observar a Saturno en esta clase de semifase, dado que desde nuestro punto de vista el Sol ilumina prácticamente todo el disco del planeta.*



Los anillos de Saturno *apenas poseen 1.000 metros de espesor. Su origen es un misterio, si bien existen dos teorías contradictorias. La primera es que se trata de los restos de un satélite destrozado por la fuerza gravitatoria de Saturno. La segunda es que se hallan formados por materia no agrupada en forma de satélite en la época de formación del planeta. Esta última se considera la más probable.*

cia ése. Dicho abultamiento es achatado y se extiende a lo largo de 1,5 millones de kilómetros. Sin embargo, los polos magnéticos de Saturno se hallan sumamente próximos a sus polos de rotación axial, lo que proporciona a su magnetosfera una forma casi simétrica.

El campo magnético y la magnetosfera parecían indicar la presencia de una ionosfera saturniana, lo que después se ha demostrado. Dicha ionosfera se extiende a miles de kilómetros sobre la superficie visible de nubes y, dado que se halla compuesta fundamentalmente de átomos de hidrógeno ionizados, refleja las ondas de radio, aunque con menos concentración que la terrestre.

Saturno emite asimismo radiación electromagnética en longitudes de radio de entre 15 y 300 metros. Tales emisiones son sumamente intensas, y provienen de dos fuentes, la más potente de las cuales se halla situada tan sólo a 10 grados del polo norte, en la parte iluminada del planeta. La otra se encuentra emplazada en un punto similar del hemisferio sur. La fuerza de ambas varía a medida que Saturno rota sobre su eje, alcanzando su punto culminante cada 10,65 horas. Es probable que ambas fuentes se encuentren relacionadas con lo que parecen indicar, esto es, el período de rotación del campo magnético reinante en las profundidades del planeta.

La causa de estas transmisiones no ha sido explicada por completo, pero no parece descabellado suponer que se encuentre asociada con la aceleración de las partículas del viento solar dentro de la mag-



netosfera, pues coinciden con la aparición de auroras boreales en los polos de Saturno. Estos fenómenos, ampliamente extendidos sobre la superficie del planeta, se hallan causados por electrones de baja velocidad que interactúan con la ionosfera saturniana. Seis de los satélites de Saturno viajan dentro de las regiones magnetosféricas del planeta, zona que también afecta a su célebre sistema de anillos.

Observado desde la Tierra, el aspecto preciso de este sistema depende de la situación del planeta en el firmamento con respecto a la órbita de la Tierra. Los anillos parecen desaparecer cada 14 ó 15 años, debido a que los contemplamos exactamente de costado, lo que hace que su extremada delgadez se confunda con el firmamento de fondo. En aquellas ocasiones en que es posible contemplarlos, la perspectiva es tan elevada o tan baja que tapan grandes áreas del planeta.

El sistema de anillos de Saturno fue visto por primera vez en julio de 1610 por el célebre físico y astrónomo italiano Galileo Galilei, quien se sirvió para ello de su nuevo telescopio, entonces recientemente desarrollado. Dicho instrumento, sin embargo, no era lo suficientemente bueno como para mostrar los anillos con claridad, a pesar del hecho de que en la época debieron de poder observarse de plano. Todo lo que Galileo pudo deducir es que Saturno tenía aspecto de ser un planeta triple. Al observarlo de nuevo unos siete años más tarde, los anillos se habían colocado de costado y resultaban invisibles. Así, afirmó que Saturno parecía haber devorado a sus propios hijos. Dada la escasa calidad de los telescopios de la época, los astrónomos se vieron impotentes a la hora de explicar el fenómeno.

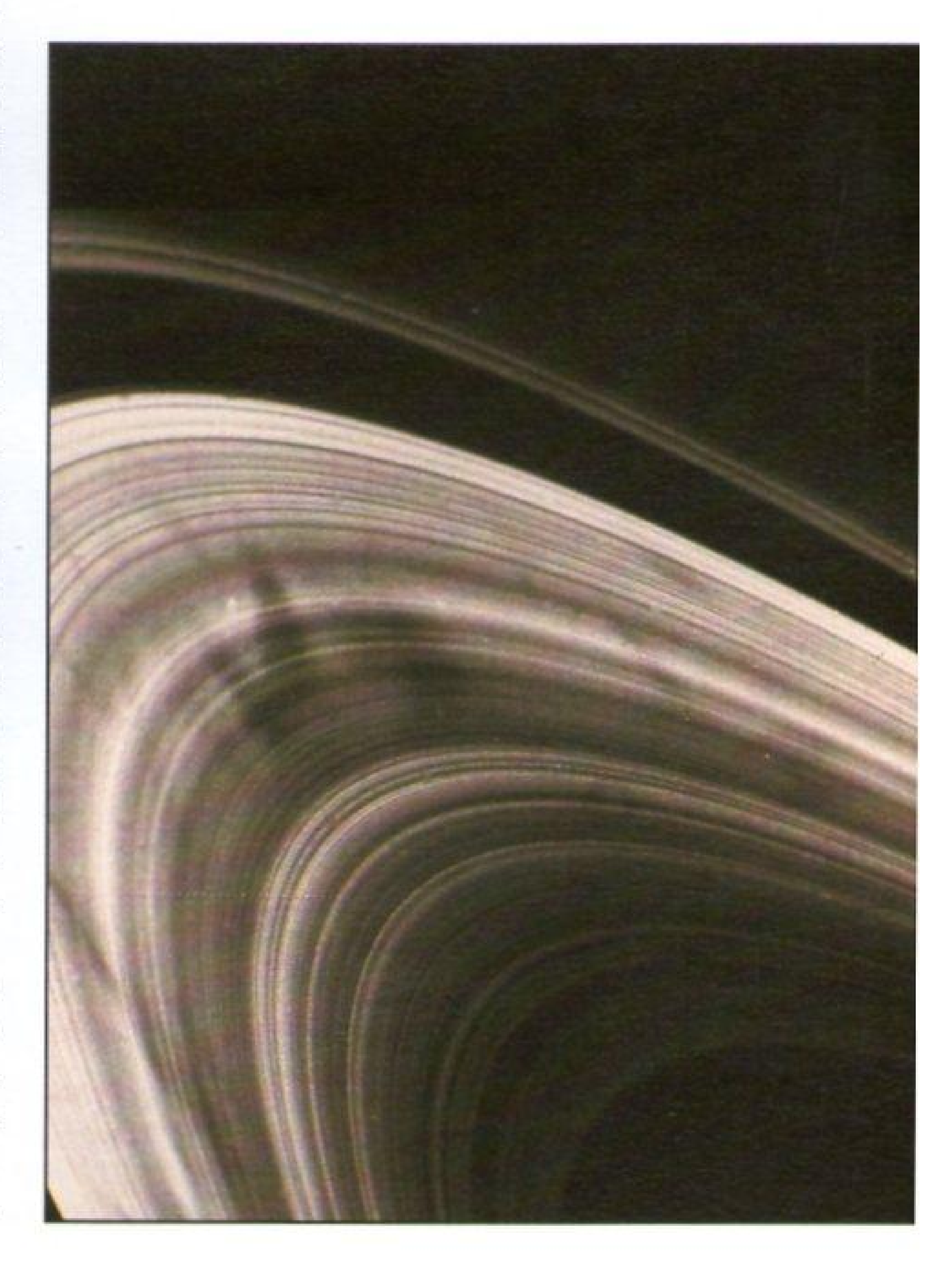
El misterio fue finalmente resuelto en 1655 por el astrónomo holandés Christiaan Huygens, quien logró advertir que Saturno se hallaba, efectivamente, rodeado por un sistema de anillos. Sin embargo, la verdadera naturaleza de éstos no fue descubierta hasta transcurridos dos siglos, en 1856, cuando James Clerk Maxwell analizó las pruebas existentes y demostró que el campo gravitatorio de Saturno habría destrozado cualquier anillo sólido en mil pedazos. Por ello, Maxwell llegó a la conclusión de que los anillos podrían estar compuestos de diminutas partículas situadas en órbita en torno al planeta. Posteriores estudios, entre los que se incluyen los resultados obtenidos por las sondas *Voyager* confirman las conclusiones de Maxwell.

A pesar del hecho de que las observaciones terrestres han detectado cierto número de anillos independientes en torno al planeta, nadie sospechaba que pudiera existir la asombrosa cantidad que revelaron las fotografías tomadas por los *Voyager*. Dichas imágenes confirmaron asimismo las sospechas de los astrónomos en relación a la extrema delgadez de los mismos. No obstante, las medidas de los Voyager han demostrado que apenas alcanzan un kilómetro de espesor, esto es, mucho menos de lo previsto, lo que los convierte en el sistema de anillos planetarios más delgado del sistema solar.

Se cree que esta delgadez obedece al efecto gravitatorio de algunos satélites de menor tamaño llamados «satélites pastores», los cuales giran en torno a Saturno cerca del plano de los anillos. Dichos satélites evitan que los mismos se desvíen hacia arriba y hacia abajo.

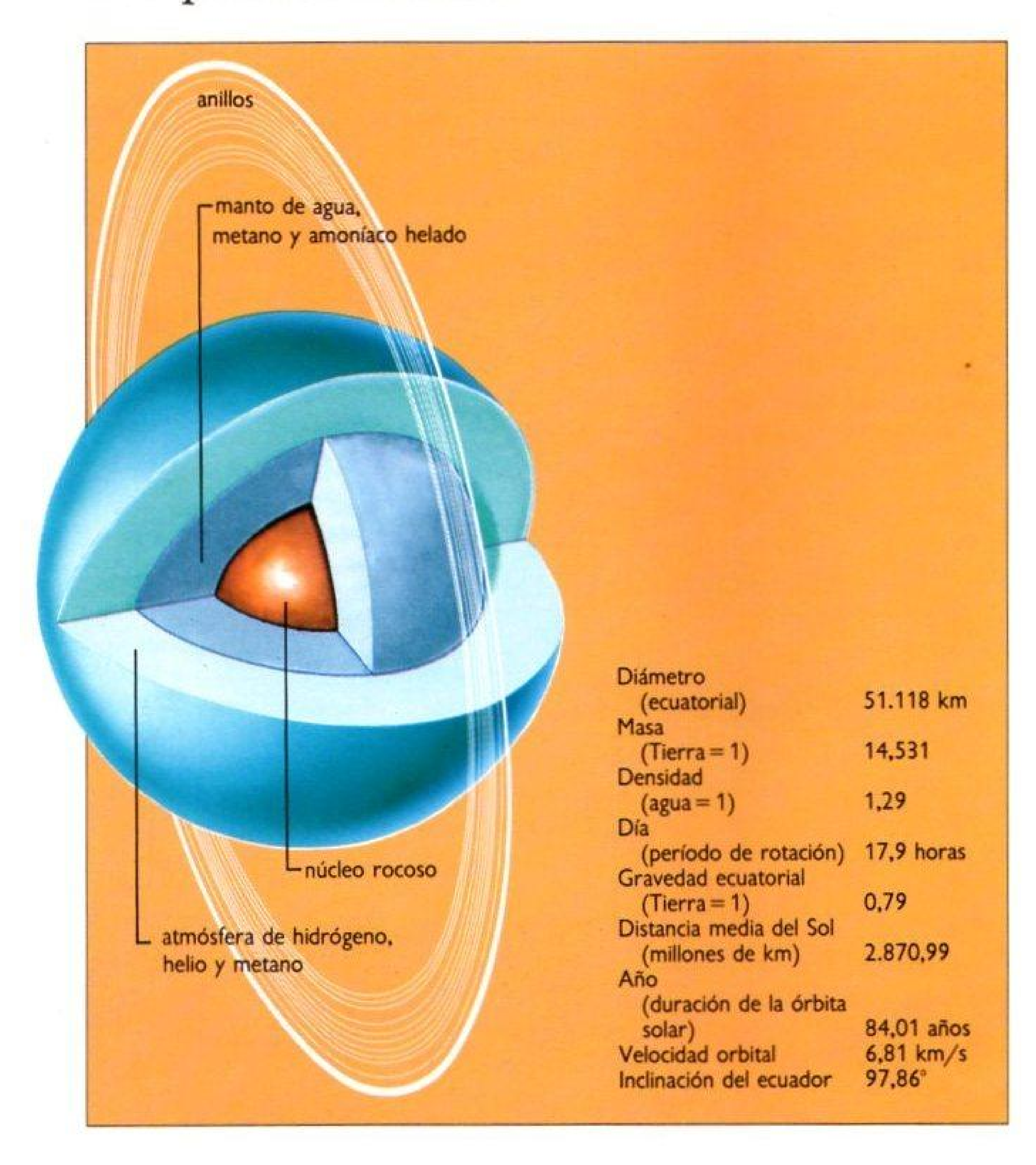
Los anillos de Saturno constituyen un magnífico espectáculo, y se extienden desde 7.000 a 74.000 km de la superficie nubosa del planeta. Los cálculos más precisos realizados hasta el momento indican que existen al menos 10.000 anillos.

Las marcas radiales oscuras *semejantes a púas se disuelven y reaparecen constantemente, girando a la par de los anillos. Son nubes de partículas eléctricamente cargadas y de un diámetro aproximado de una milésima de milímetro que se encuentran suspendidas sobre el plano de los anillos y se desplazan bajo la influencia del campo magnético de Saturno. Se ha observado que se forman en cuestión de minutos al emerger los anillos de la sombra del planeta, y apenas sobreviven a una o dos revoluciones antes de desvanecerse.*



URANO

• *El planeta ladeado*



Urano, otro de los gigantes gaseosos, fue el primer planeta descubierto en tiempos relativamente recientes; los otros eran ya conocidos desde la antigüedad. Urano fue descubierto en 1781 por William Herschel, probablemente el más fructífero observador visual de la historia de la astronomía.

Desde entonces, nuestro conocimiento acerca de este planeta se ha acrecentado a pasos agigantados, especialmente gracias a los datos enviados por el *Voyager 2*. Los cálculos realizados muestran que Urano posee probablemente un núcleo de hierro y silicatos de unos 14.500 km de diámetro, esto es, algo mayor que el tamaño de nuestro planeta terrestre. Sobre el núcleo se extiende un manto de poco más de 10.000 km de espesor compuesto, según se cree, de hielo, amoníaco y metano, posiblemente en estado gélido o acaso líquido.

Por último, observamos la presencia de una capa de 9.000 km de grosor formada por moléculas de hidrógeno, helio y metano. El metano es una parte esencial de la espesa atmósfera del planeta, lo único que podemos observar de él desde la Tierra. Fue fotografiada por la nave *Voyager 2* en su aproximación de 1986 al polo sur del planeta. Claramente, su estructura difiere de la de Júpiter y Saturno del mismo modo que su temperatura interna, situada en torno a los 7.000 K. A pesar del hecho de que emite algo más de calor —aproximadamente un 0,1 por ciento— del que recibe del Sol, el núcleo de Urano apenas parece poseer elementos que pudieran proporcionarle calor interno.

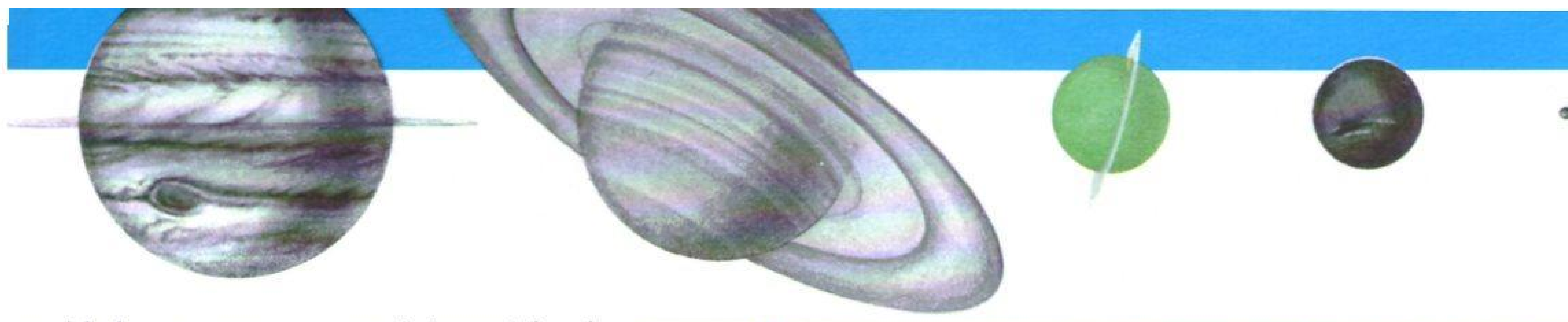
Si bien la presión en el centro del núcleo del planeta equivale a 20 millones de veces la presión atmosférica terrestre, no resulta lo bastante intensa como para licuar el hidrógeno (estado en el que sería eléctricamente conductor). Aunque su masa es apenas un cinco por ciento inferior a la de Júpiter, Urano posee una densidad media aproximada similar a la de éste, aproximadamente 1,3 veces la del agua y, por ello, resulta más denso que Saturno.

La superficie visible de Urano completa su rotación en poco menos de ocho horas, lo que resulta bastante lento si lo comparamos con Júpiter y Saturno. Sin embargo, su eje de rotación resulta único, pues se halla ladeado de tal modo que se sitúa prácticamente en la órbita del planeta. De hecho, el polo norte se encuentra emplazado justamente debajo del plano orbital, lo que significa que Urano gira sobre su eje en dirección inversa si lo comparamos con el resto de los planetas. Se cree que ello es debido a alguna colisión sufrida en cierto momento de su existencia con otro cuerpo de dimensiones considerables.

A pesar de no poseer en su interior hidrógeno líquido conductor de electricidad, Urano posee un campo magnético propio generado en el interior del manto. Dicho campo es bipolar y posee una inclinación de 60 grados con respecto al eje de rotación del planeta, lo que lo convierte en el más inclinado de cualquier planeta del sistema solar.

La capa superior de nubes de Urano muestra un diseño de franjas y gira en la misma dirección de la masa sólida del planeta (este-oeste), si bien a mayor velocidad. De hecho, las nubes giran más velozmente cuanto más cercanas se hallan a los polos, exactamente al contrario de lo que ocurre en planetas como Júpiter y Saturno.

Las nubes de la atmósfera superior a Urano son similares a las de los dos grandes gigantes gaseosos. Por desgracia, ni siquiera el *Voyager 2* ha logrado averiguar detalles acerca del sistema climáti-

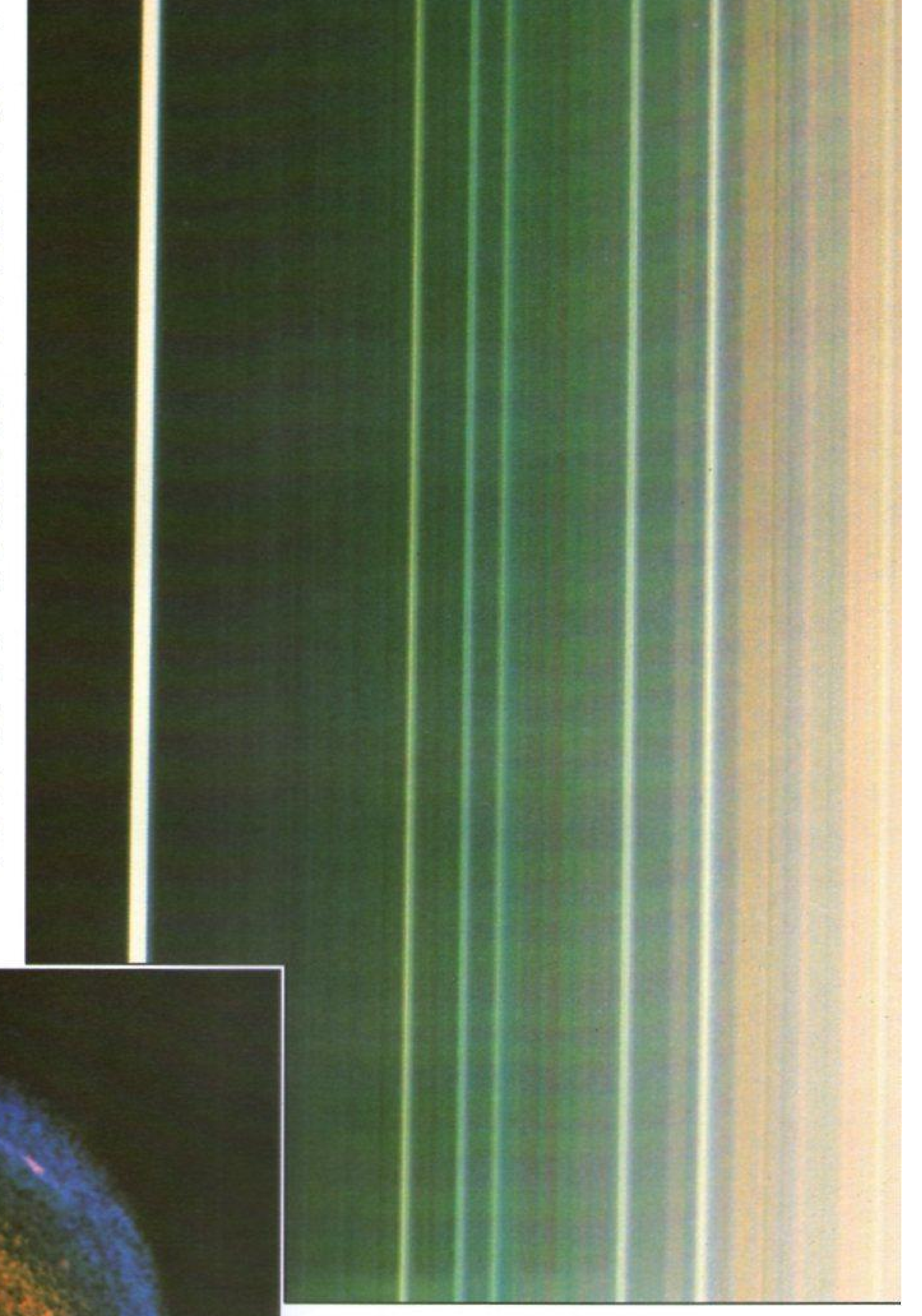


co del planeta, pues gran parte de la atmósfera de Urano se halla oculta por la neblina producida por la acción de la luz solar sobre el acetileno y el etano presentes en la misma.

Urano posee un sistema de anillos que fue descubierto en marzo de 1977 —antes incluso de la llegada del *Voyager 2*— con ocasión de su paso frente a una estrella de novena magnitud. En dicha ocasión, los observadores terrestres advirtieron que la estrella «guiñaba» y que pareció sufrir cinco breves eclipses antes de verse ocultada por el disco del planeta. De ello se dedujo que Urano se hallaba circundado por un sistema de anillos, hecho que se confirmó tras la aproximación del *Voyager 2*.

Hoy sabemos que existen al menos nueve anillos, y no cinco como se suponía en 1977. Todos ellos descansan en una órbita situada entre 42.000 y 52.000 km del centro del planeta, lo que significa que están a una altura de entre 16.000 y 26.000 km por encima de su superficie nubosa. Se trata de anillos extremadamente delgados, y ocho de ellos muestran una anchura media inferior a 10 km.

Sin embargo, alguna de sus partes se apartan de esta medida: el espesor de la exterior, llamada Épsilon, varía entre los 20 y los 100 km. Asimismo, se trata de un anillo en forma elíptica, lo que hace que se acerque a 800 km del planeta en determinados puntos. Cinco de los anillos restantes son también elípticos, y sólo tres son circulares. Si bien sólo los primeros varían en cuanto a su grosor, todos ellos resultan extremadamente delgados.

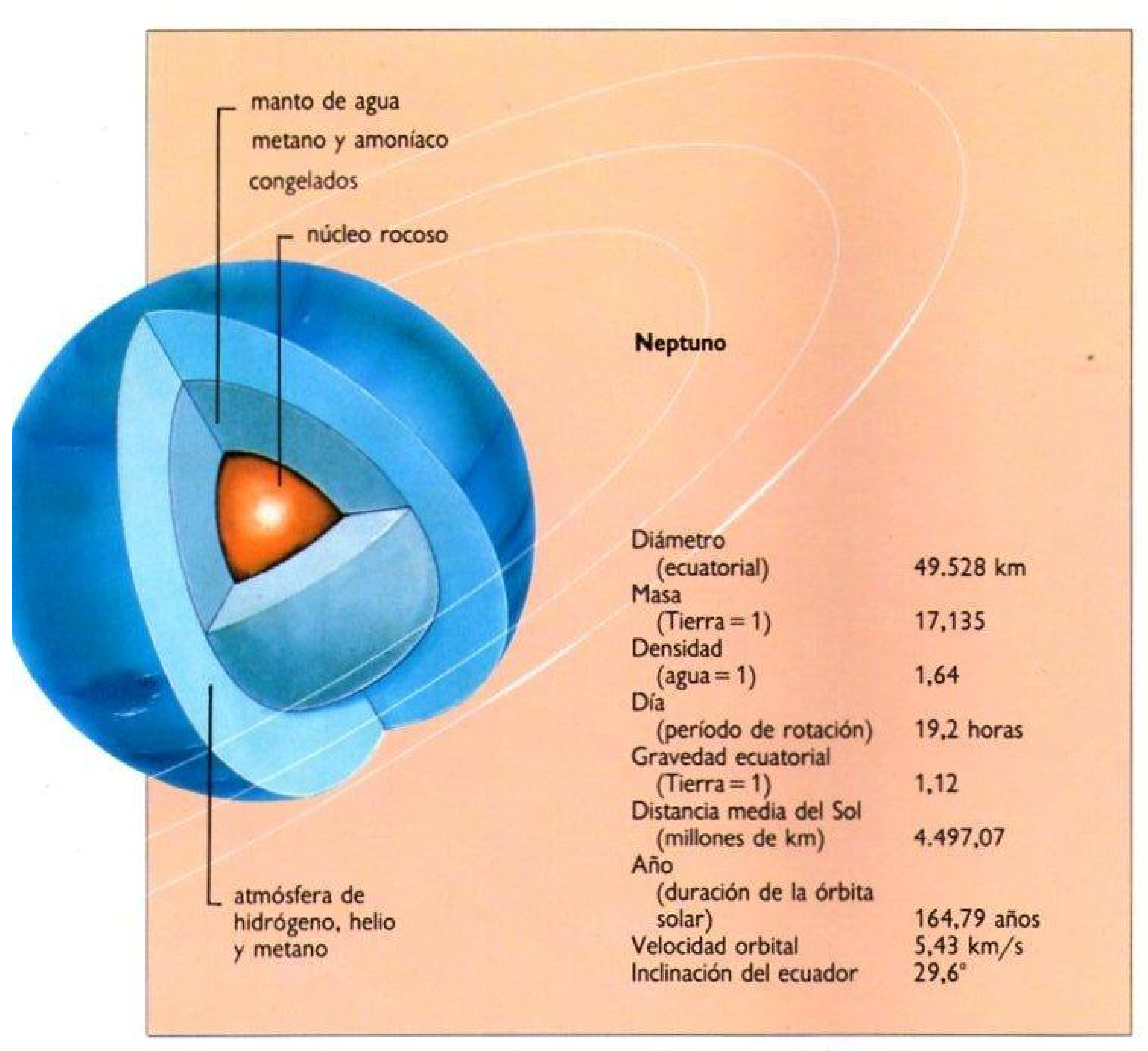


Un velo de metano envuelve al planeta *(izquierda), oscureciendo las franjas que forman los sistemas nubosos. Empero, los colores artificiales aplicados a esta imagen computerizada resaltan detalles como la nube de la parte superior derecha.*

Los anillos de Urano *(arriba) los forman partículas de dos escalas distintas de tamaño. El diámetro de muchas de ellas oscila entre pocos cm y varios metros, si bien la mayoría apenas alcanza el grosor de unas pocas milésimas de milímetro.*

NEPTUNO Y PLUTÓN

En los límites del sistema solar



Diámetro (ecuatorial)	49.528 km
Masa (Tierra = 1)	17,135
Densidad (agua = 1)	1,64
Día (período de rotación)	19,2 horas
Gravedad ecuatorial (Tierra = 1)	1,12
Distancia media del Sol (millones de km)	4.497,07
Año (duración de la órbita solar)	164,79 años
Velocidad orbital	5,43 km/s
Inclinación del ecuador	29,6°

La existencia de Neptuno, el último de los gigantes gaseosos del sistema solar, fue vaticinada ya en el siglo XX por dos astrónomos: el inglés John Couch Adams y el francés Urbain Jean Joseph Leverrier. Ambos habían visto estimulada su búsqueda de un octavo planeta por las aparentes irregularidades observadas en la órbita de Urano. Al igual que el resto de los astrónomos de la época, ambos científicos suponían que la ley de Newton acerca de la gravitación universal era minuciosamente precisa y, sirviéndose de ella, llegaron a la conclusión de que las irregularidades orbitales de Urano debían obedecer a la atracción gravitatoria de otro planeta situado más allá de su órbita. La demostración de su teoría no resultó fácil: para descubrir el lugar que ocupaba dicho planeta en el espacio se vieron obligados a presumir su masa y órbita y elaborar a partir de ellas sus deducciones.

No obstante, en 1843, Adams resolvió el problema durante su primer proyecto de investigación, poco después de graduarse. A sus 24 años de edad, era considerado aún demasiado joven e inexperto, por lo que pocos tomaron en serio su descubrimiento. En aquella época, ningún observatorio británico contaba con mapas actualizados de la región celeste en la que los cálculos de Adams habían situado el planeta. Careciendo de tales mapas, la comprobación hubiera sido larga y tediosa.

Leverrier halló menos reticencias por parte de sus colegas cuando anunció el descubrimiento en 1846. El observatorio de Berlín acababa de completar un nuevo mapa de esa zona celeste, y su director, Johann Galle, puso en marcha una operación de búsqueda. Neptuno fue observado por primera vez el 23 de septiembre de 1846, a menos de un grado de desviación de su supuesto emplazamiento.

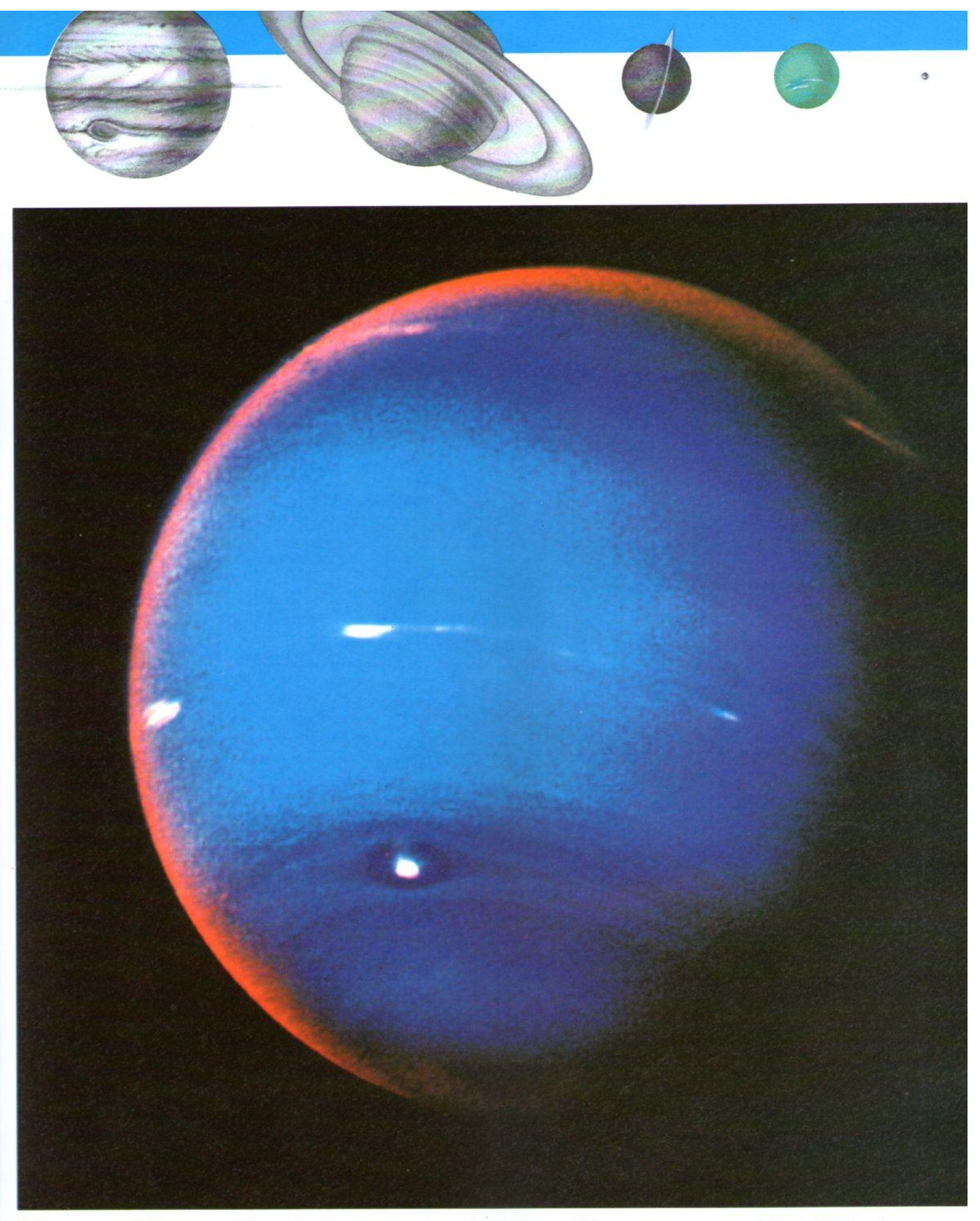
Situado en una órbita media de 4.497 millones de kilómetros de distancia del Sol, Neptuno no sólo es más lejano de los gigantes gaseosos conocidos del sistema solar, sino también uno de los planetas más difíciles de observar desde la Tierra.

Antes de la misión del *Voyager,* los astrónomos habían calculado la estructura de las regiones interiores de Neptuno en base a su masa, tamaño y posición conocidos. De estos datos dedujeron correctamente que, al igual que el resto de los gigantes gaseosos, contaba con un núcleo central de hierro mezclado con silicatos similar al de Urano.

Alrededor de dicho núcleo, se cree que Neptuno posee un manto distinto del de su compañero, y formado más bien por moléculas ionizadas de agua, amoníaco y, posiblemente, hidroxilo. De hecho, este manto se describe en ocasiones como un «océano de iones». Sobre el manto se extiende una envoltura de helio, hidrógeno y metano.

Al igual que los demás gigantes gaseosos, Neptuno emite más energía que la que recibe del Sol, en una proporción de 2,8. Ello equivale a una actividad mucho mayor que la de Urano, la cual tan sólo sobrepasa en 0,1 por ciento la cantidad de energía recibida.

Las observaciones terrestres condujeron a los astrónomos a pensar que Neptuno poseía su propio campo magnético, teoría que se vio confirmada por las mediciones efectuadas por el *Voyager 2.* No obstante, dicho campo resultó ser más débil que los de los otros tres gigantes gaseosos, averiguándose que posee una inclinación de 50 grados con respecto al eje de rotación del planeta. Sorprendentemente, el campo no atraviesa el centro del planeta, sino que se halla desplazado unos 10.000 km en dirección a uno de sus costados. Se piensa, por tanto, que las corrientes eléctricas existentes en el astro —las mismas que ocasionan el campo y la magnetosfera asociada al mismo— deben de hallarse relativamente próximas a la superficie.



Frío, remoto y azul, *Neptuno es el último de los gigantes gaseosos conocidos. Esta imagen del Voyager nos muestra su azulada superficie de nubes y los blancos cirros de metano que la circundan. Las nubes más elevadas giran con el planeta, y no con las nubes de las capas inferiores, más veloces.*



Las blancas nubes de cristales de metano *constituyen uno de los rasgos más llamativos de Neptuno, y resultan visibles en esta imagen tomada por el* Voyager 2. *Flotan a gran altura sobre las azuladas capas de nubes y se mueven con independencia de las mismas. Una de ellas, llamada* scooter, *se mueve tan velozmente que llega a alcanzar y adelantar a la Gran Mancha Oscura cada pocos días neptunianos.*

Debido a la naturaleza del campo magnético de Neptuno, el punto en el que la magnetosfera choca con el viento solar se encuentra situado a más de 800.000 km del planeta, aproximadamente el doble que en el caso de Urano. Por su parte, también Neptuno emite ondas de radio y experimenta auroras boreales en sus regiones ecuatoriales.

Al igual que los demás gigantes gaseosos, Neptuno posee su propio sistema de anillos. Cuenta con tres de ellos, uno de los cuales resulta bastante débil. Todos ellos son considerablemente menos densos que los de Júpiter, Saturno y Urano. Antes de la llegada del *Voyager 2,* se pensaba que dichos anillos podían tener la forma de arcos de materia fracturados, pero lo cierto es que todos ellos se encuentran completos. No obstante, sí es cierto que poseen zonas más brillantes que otras debido, probablemente, a la irregular distribución de las partículas de que se componen. Algunas de estas partículas llegan a alcanzar unos pocos kilómetros de diámetro, y se denominan «lunillas».

Las secciones menos brillantes de los anillos de Neptuno son tan mortecinas que el propio *Voyager 2* apenas fue capaz de detectarlas. Con cada anillo parece haber asociado un único «pastor», mientras que los dos anillos más brillantes se hallan unidos a dos de los satélites recientemente descubiertos. Debido a lo expandida que se encuentra la materia de los anillos, ésta ocupa tan sólo una décima parte del espacio de los mismos. No obstante, todos ellos aparecen acompañados de un disco de diminutas partículas esparcidas a lo largo de toda su extensión.

De toda la información recibida del *Voyager 2,* la más espectacular fue la relativa al sistema de nubes de Neptuno. La superficie nubosa del planeta, de un hermoso color azul, se halla azotada por poderosos vientos que en algunas latitudes llegan a alcanzar los 30 metros por segundo. Neptuno posee asimismo una ya antigua mancha de color azul oscuro que, bautizada con el nombre de Gran Mancha Oscura, se desplaza más lentamente que las nubes que la rodean en el hemisferio sur del planeta.

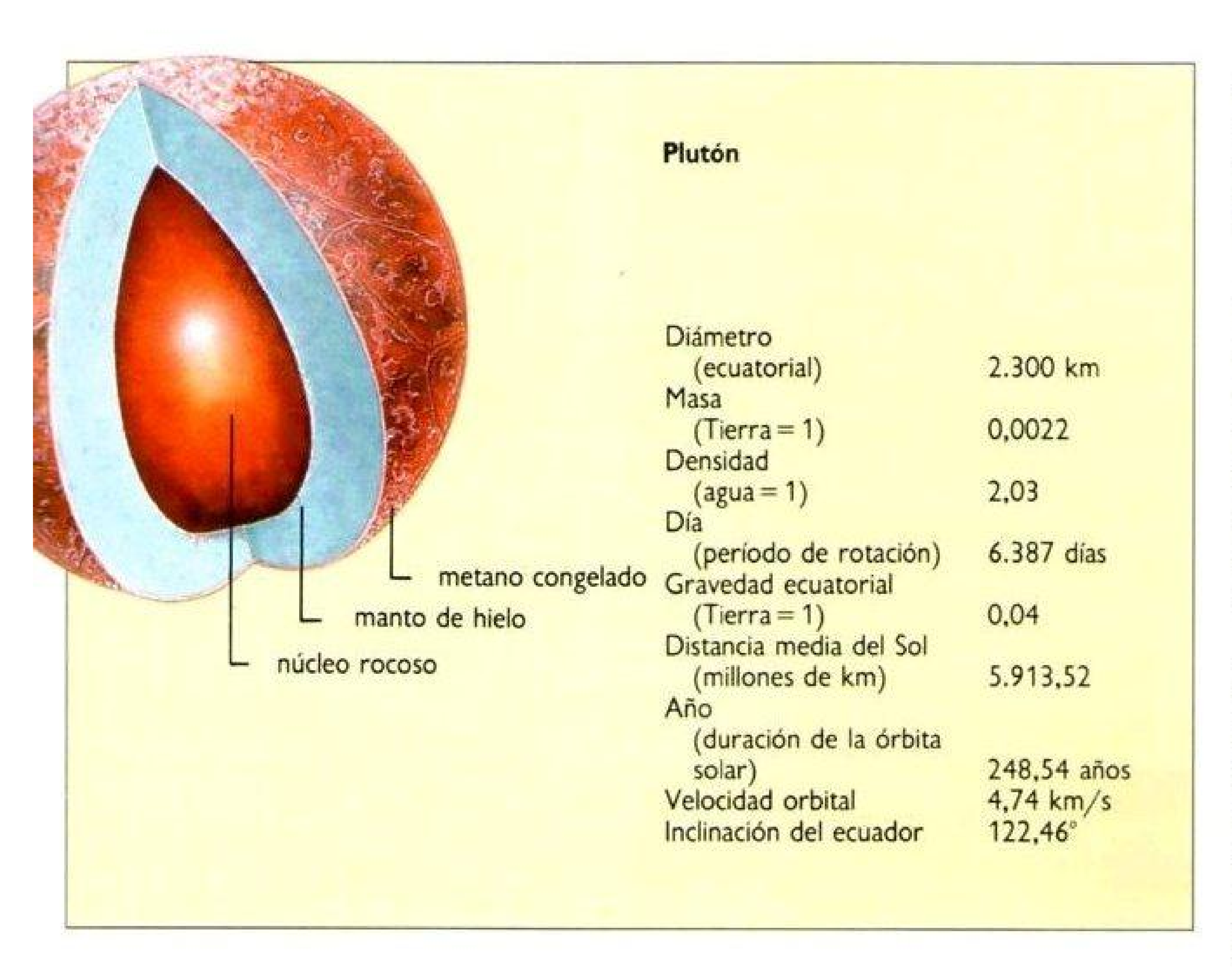
La Gran Mancha Oscura de Neptuno posee una longitud de 14.000 km y mide casi 6.667 km en dirección norte-sur. La primera podría acomodar confortablemente a la totalidad del planeta Tierra. El hemisferio sur cuenta además con otra mancha similar, aunque más pequeña, situada 33 grados más cerca del polo sur del planeta.

A unos 50 kilómetros de altitud sobre la azulada superficie de las nubes se extienden vaporosas nubes de metano en forma de cirros que no intervienen en el veloz movimiento relativo de la capa de nubes situada bajo ellas. Por el contrario, parecen inmóviles —cual si se tratara de las nubes terrestres suspendidas en el aire que a veces coronan las cumbres de las montañas— y se desplazan a una velocidad acorde con la rotación del planeta.

La atmósfera de Neptuno se extiende por encima de las nubes de metano. Se compone fundamentalmente de hidrógeno —hasta un 85 por ciento—, con un 13 por ciento de helio y un 2 por ciento de metano. Excitado por la radiación ultravioleta procedente del Sol, el metano experimenta un peculiar ciclo de cambios químicos, descomponiéndose en carbono, hidrógeno y una mezcla de hidrocarburos entre los que se incluye el acetileno.

Dichos hidrocarburos descienden luego hasta alcanzar niveles más fríos, en los que se condensan y congelan. A su vez, estos hielos se hunden aún más profundamente hasta alcanzar capas cálidas de la atmósfera en las que se evaporan y recombinan para





Plutón

Diámetro (ecuatorial)	2.300 km
Masa (Tierra = 1)	0,0022
Densidad (agua = 1)	2,03
Día (período de rotación)	6.387 días
Gravedad ecuatorial (Tierra = 1)	0,04
Distancia media del Sol (millones de km)	5.913,52
Año (duración de la órbita solar)	248,54 años
Velocidad orbital	4,74 km/s
Inclinación del ecuador	122,46°

formar nubes de gas metano que se elevan y reinician el ciclo.

Incluso después del descubrimiento de Neptuno, los astrónomos continuaban observando irregularidades en el movimiento de Urano y hasta en el del propio Neptuno. Así, siguiendo el ejemplo de Adams y Leverrier, Percival Lowell y William Pickering lograron calcular la posición de un nuevo planeta a cuya existencia podían atribuirse dichas alteraciones. En 1905 comenzó la búsqueda del nuevo planeta, pero fue en 1930 cuando en el observatorio Lowell de Arizona un joven astrónomo llamado Clyde Tombaugh logró fotografiar un diminuto objeto situado a unos 5 grados de la posición prevista. Dicho objeto se hallaba sujeto a una órbita planetaria, y fue bautizado con el nombre de Plutón.

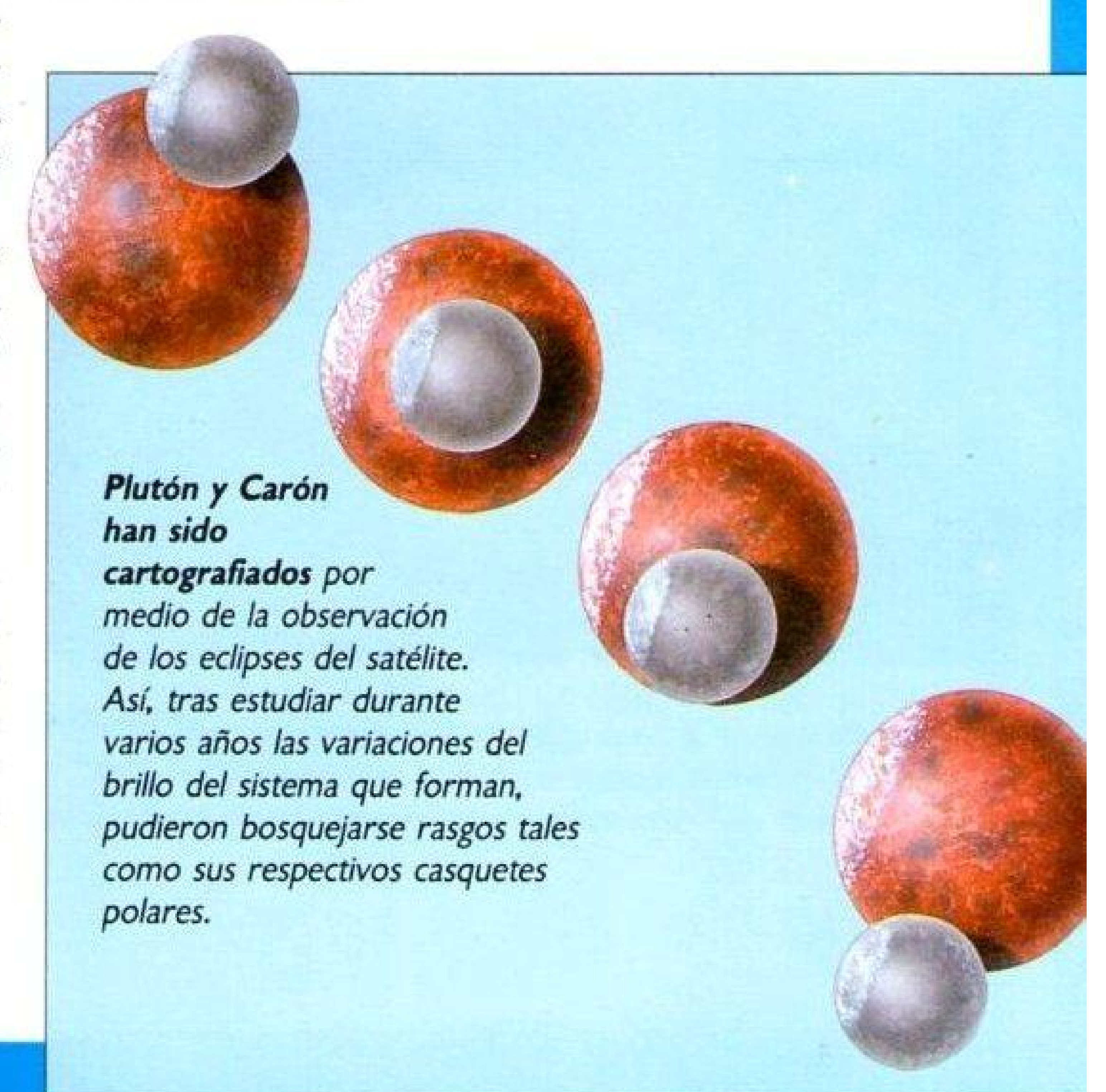
El planeta Plutón es extremadamente difícil de observar desde la Tierra debido a su lejanía y a su pequeño tamaño: su diámetro es de apenas 2.300 km, eso es, aproximadamente la mitad de Tritón, el mayor satélite de Neptuno. La masa de Plutón equivale a tan sólo un 0,22 por ciento de la terrestre.

La órbita de Plutón ha demostrado ser completamente distinta a la de cualquier otro planeta del sistema solar. No sólo es notablemente excéntrica —mucho más que la del propio Mercurio—, sino que, si bien en ocasiones orbita a más de 2.800 km más allá de Neptuno durante su recorrido en torno al Sol, en otras se acerca mucho más al Sol que aquel. La órbita posee una inclinación mucho mayor que la de cualquier otro astro del sistema solar: 17 grados con respecto al plano de éste.

Su tamaño, masa y órbita respaldan la teoría de que no se trata de uno de los planetas mayores, sino de un asteroide grande o incluso de un satélite planetario evadido de su órbita. Su atracción gravitatoria es demasiado escasa como para alterar por sí misma las órbitas de Neptuno y Urano, lo que significa que tales alteraciones deben obedecer a otra causa, posiblemente al influjo de otro planeta aún no descubierto.

En torno a Plutón tan sólo ha podido detectarse la existencia de una atmósfera tenue y nebulosa, pero las observaciones por rayos infrarrojos realizadas mediante espectroscopio han revelado que se halla cubierto de hielo. Gran parte de este hielo es metano congelado al que la luz solar proporciona un tinte rojizo, pero también existen ciertas proporciones de agua y amoníaco congelados.

Si Plutón fuera un asteroide gigante, resultaría único entre los de su clase debido al hecho de que cuenta con un satélite propio. Dicho satélite fue descubierto en 1978 por James Christy desde el observatorio de Lowell. Bautizado con el nombre de Carón, este satélite gira en órbita sobre Plutón a una distancia de unos 20.000 km. Las rotaciones axiales de Plutón y Carón se hallan sincronizadas debido a las fuerzas mareomotrices establecidas entre ambos. Carón, sin embargo, es demasiado pequeño como para haber conservado el metano que acaso poseyó algún día, y parece cubierto de agua en estado de hielo.



Plutón y Carón han sido cartografiados *por medio de la observación de los eclipses del satélite. Así, tras estudiar durante varios años las variaciones del brillo del sistema que forman, pudieron bosquejarse rasgos tales como sus respectivos casquetes polares.*

SATÉLITES

• *Los acólitos de los planetas*

La Tierra no es el único planeta que posee un satélite en órbita. No obstante, este hecho permaneció ignorado hasta 1608, año en que Galileo, contemplando el firmamento a través del recién inventado telescopio, observó los cuatro satélites principales de Júpiter. Desde entonces se ha descubierto casi todos los planetas principales, a excepción de Mercurio y Venus, tienen satélites en órbita.

La existencia de tales cuerpos en un sistema solar condensado a partir de una nebulosa solar (págs. 102-103) no resulta sorprendente. El proceso produjo numerosos desechos en forma de planetesimales, algunos de los cuales se quedaron atrás y fueron capturados por los campos gravitatorios de los principales planetas.

En cuanto a la Tierra, la órbita de la Luna se halla inclinada 5 grados respecto a la eclíptica que señala el plano de la órbita terrestre en torno al Sol. No obstante, esto resulta excepcional, pues las órbitas de los miembros de mayor tamaño de otros sistemas de satélites se hallan mucho más cercanas al plano ecuatorial de sus planetas respectivos.

En lo que respecta a los principales planetas, Marte posee dos satélites situados en órbita en su plano ecuatorial. Los cuatro satélites principales de Júpiter también orbitan en el plano ecuatorial, al igual que los más cercanos y diminutos, Metis, Adrastea, Amaltea y Tebe. No obstante, los satélites exteriores de Júpiter —también de pequeño tamaño y presumiblemente capturados por el gigante poco después de formarse el sistema solar— poseen inclinaciones mayores.

Existe un grupo formado por cuatro de ellos —Leda, Himalia, Lisitea y Elara— que giran en torno a Júpiter con una inclinación aproximada de 27 grados. Un segundo grupo compuesto por los cuatro más lejanos —Ananke, Carmen, Pasífae y Sinope— giran con una inclinación situada en torno a los 150 grados, lo que significa que muestran un desplazamiento inverso.

Con excepción del más lejano, Febe, todos los satélites de Saturno orbitan a lo largo del plano ecuatorial. Así, Febe no es probablemente sino una incorporación de última hora, dado que se desplaza en una órbita excéntrica y se encuentra unos 113 millones de kilómetros más lejos que el siguiente, Japeto, esto es, a una distancia cuatro veces mayor. Urano resulta similar en el hecho de que cada uno de sus 15 satélites se desplaza a lo largo de la órbita ecuatorial del planeta.

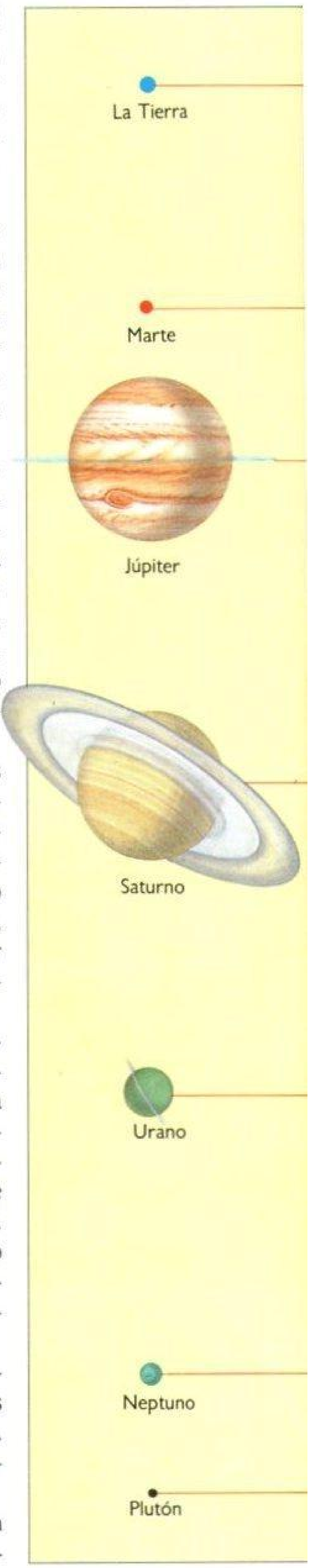
A diferencia de sus dos satélites exteriores, los seis interiores de Neptuno poseen órbitas ecuatoriales. De los dos primeros, el mayor, Tritón, dotado de un diámetro de 2.272 km, posee una órbita de no menos de 160 grados de inclinación, lo que le proporciona una órbita retrógrada. El otro, Nereida, situado a una distancia 16 veces superior del planeta, posee una inclinación de unos 27 grados.

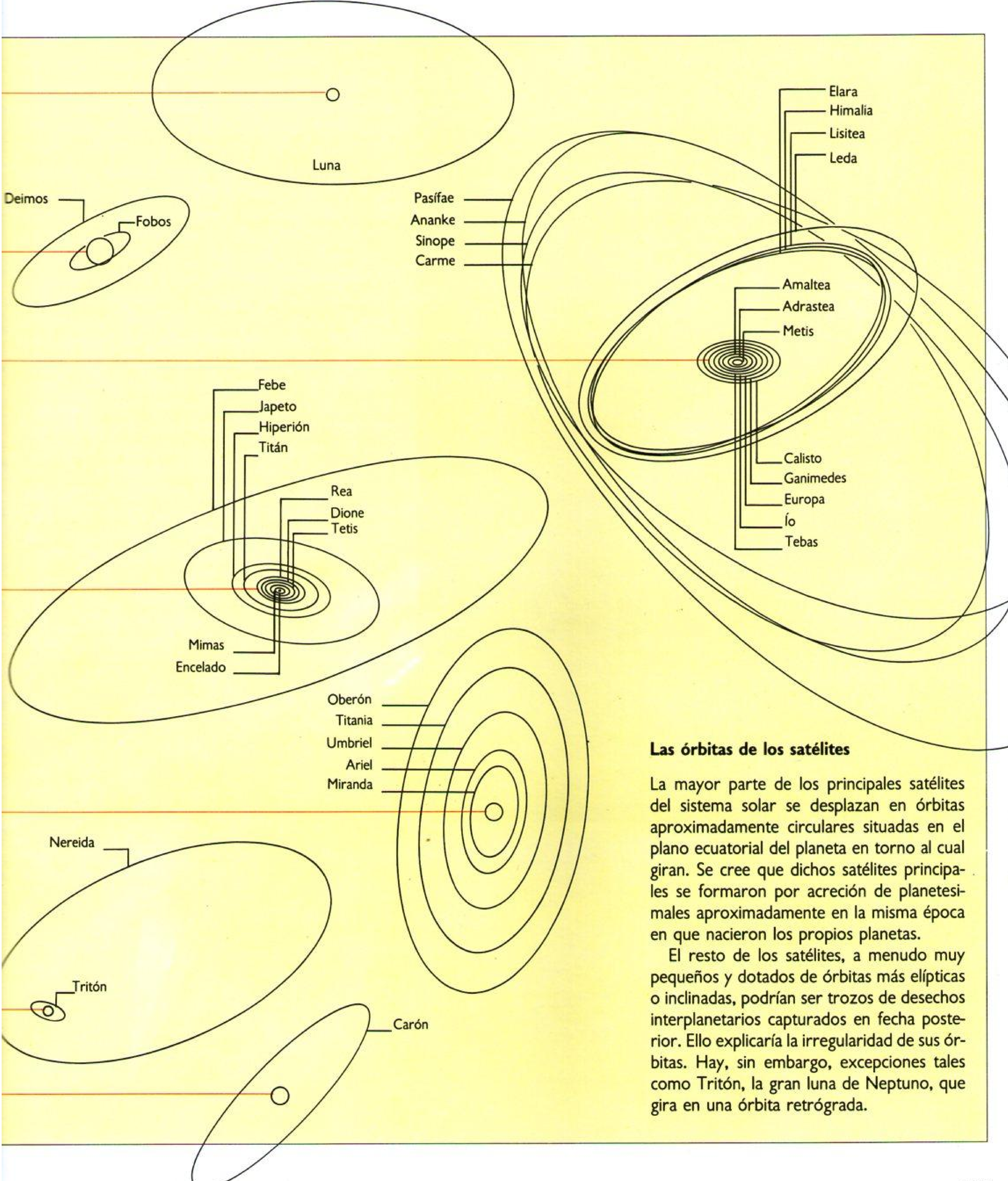
El número de satélites con que cuentan los planetas principales varía considerablemente. Los planetas telúricos interiores tienen muy pocos: uno la Tierra, dos Marte y ninguno en el caso de Mercurio y Venus. En lo que se refiere a los gigantes gaseosos, la cosa cambia. Júpiter posee no menos de 16 satélites, Saturno 18, Urano 15 y Neptuno 8. Ello no resulta sorprendente, dado que los cuatro poseen una masa mucho mayor y, por tanto, campos gravitatorios más poderosos, capaces de capturar más materia planetaria.

La masa de la Tierra es tan sólo 81 veces superior a la de la Luna, mientras que la de Júpiter es más de 12.000 veces la del mayor de sus satélites. Saturno, por su parte, es más de 4.000 veces mayor que Titán, su satélite gigante.

En el caso de Urano, las mediciones muestran que el planeta es 4.000 veces mayor que su satéli-

Europa, el gran satélite de Júpiter, *recorre una órbita alineada con el plano ecuatorial del planeta. Con 3.100 km de diámetro, es algo más pequeño que la Luna.*

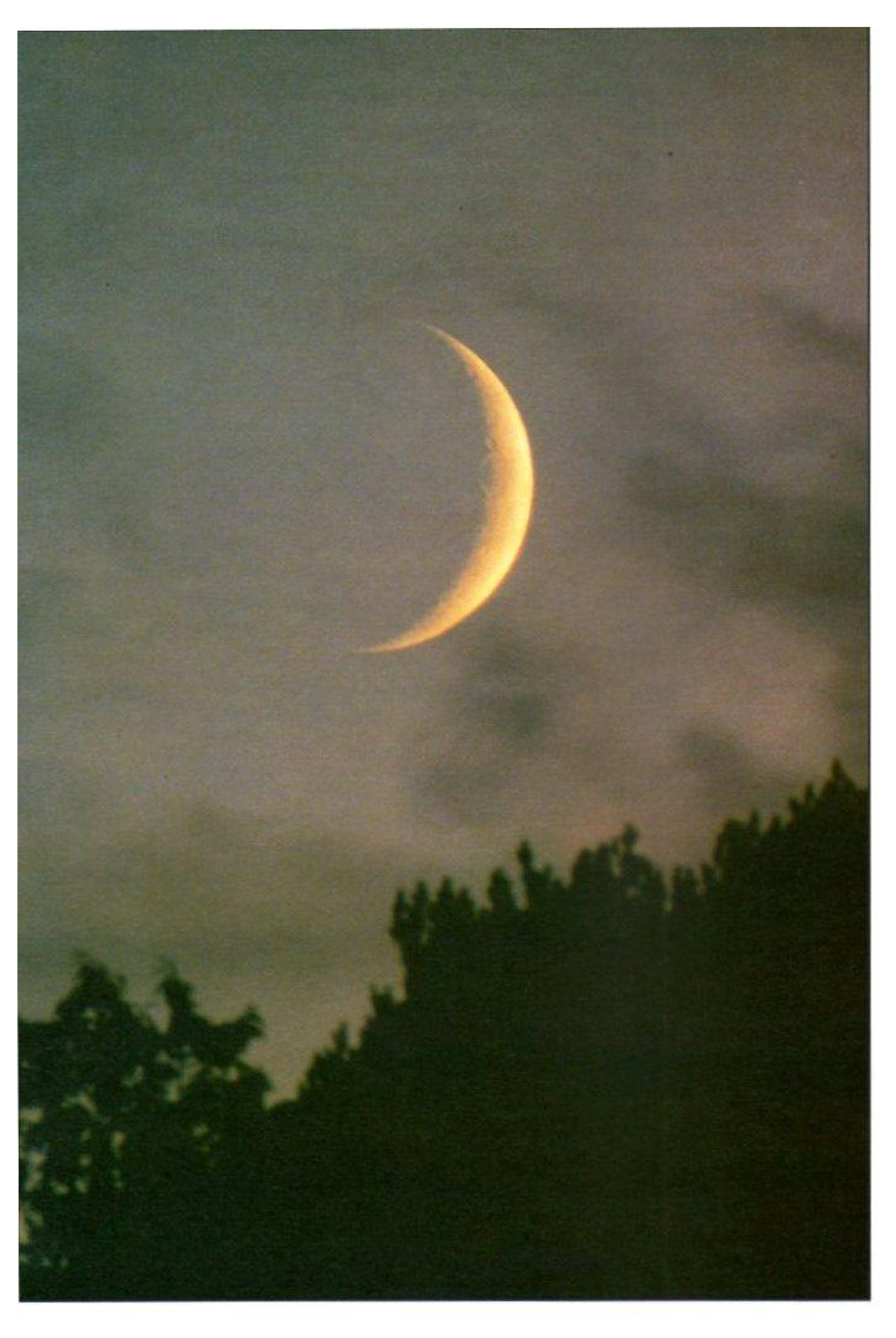




Las órbitas de los satélites

La mayor parte de los principales satélites del sistema solar se desplazan en órbitas aproximadamente circulares situadas en el plano ecuatorial del planeta en torno al cual giran. Se cree que dichos satélites principales se formaron por acreción de planetesimales aproximadamente en la misma época en que nacieron los propios planetas.

El resto de los satélites, a menudo muy pequeños y dotados de órbitas más elípticas o inclinadas, podrían ser trozos de desechos interplanetarios capturados en fecha posterior. Ello explicaría la irregularidad de sus órbitas. Hay, sin embargo, excepciones tales como Tritón, la gran luna de Neptuno, que gira en una órbita retrógrada.



La Luna terrestre brilla *como resultado del reflejo de la luz solar. Muestra diversas fases que oscilan entre un delgado creciente y la luna llena debido a que nos presenta regularmente distintas porciones de su superficie iluminada. La Luna es grande en relación con la Tierra, por lo que ambos astros podrían considerarse como un sistema planetario binario.*

te más denso, Oberón, mientras que Neptuno es 800 veces mayor que su satélite Tritón, de tamaño relativamente grande.

A comienzos de siglo se aceptaba generalmente que la Luna se desprendió de la Tierra cuando ésta aún rotaba a gran velocidad, antes de que superara su etapa «plástica». No obstante, las opiniones reinantes hoy día afirman que se formó por acreción independientemente de nuestro planeta. Así, se trata de un planetesimal, si bien de gran tamaño, que se ha aliado con la Tierra para formar un sistema planetario binario en el que cada componente orbita en torno al otro.

La Luna brilla en el cielo a causa del reflejo de la luz solar —característica común a todos los planetas y satélites del sistema solar— y, por ello, nos muestra distintas fases a medida que se desplaza por el firmamento. La longitud de cada ciclo completo de fases, llamado mes sinódico, es de 29,5 días. No òbstante, si medimos el mes según el tiempo que tarda la Luna en completar un circuito a través de las estrellas del firmamento nocturno, hallaremos que su duración es de tan sólo 27,3 días, dado que también hay que tener en cuenta el movimiento de la Tierra en torno al Sol.

El rostro moteado de la Luna es distinguible a simple vista; muestra grandes zonas oscuras que en tiempos se interpretaban como mares y océanos. No obstante, gracias a las observaciones ópticas realizadas, a los satélites artificiales y a las expediciones tripuladas a la Luna hoy sabemos que no se trata en absoluto de mares, sino de vastas llanuras planas formadas por lava derretida procedente del interior de la corteza. Estas, a menudo bordeadas por cordilleras montañosas y salpicadas de cráteres, muestran la existencia de fallas geológicas.

Si bien las llanuras también poseen cráteres, éstos son más numerosos en otras zonas de la superficie lunar. Su tamaño varía considerablemente. Muchos de ellos muestran un pico central y se supone que la mayoría son el resultado del bombardeo de la superficie lunar con material planetesimal o procedente de cometas.

Las llanuras y las fallas, sin embargo, indican un proceso de cambios geológicos inherente a la propia Luna. De ello se han hallado pruebas adicionales gracias a los equipos sísmicos instalados por los astronautas que han pisado la Luna, obteniéndose al mismo tiempo confirmación independiente de que la Luna posee actividad geológica.

La Luna parecería hallarse probablemente dotada de un núcleo interno de unos 600 km de diámetro, cubierto por un núcleo exterior rocoso en estado semiderretido que alcanzaría un grosor de 350 km más.

Sobre él descansan el manto y la corteza o litosfera, cuyo espesor conjunto alcanzaría en torno a los 1.070 km. Se ha registrado la existencia de profundos seísmos en el núcleo exterior derretido, así como más cerca de la superficie.

Las muestras de roca lunar muestran una edad de 4.500 millones de años, esto es, más que las rocas más antiguas conocidas en la Tierra, cuya edad no supera los 3.800 millones de años. Esta discrepancia podría muy bien deberse a que las rocas terrestres de más antigüedad se han visto destruidas por la erosión, la actividad geológica y las erupciones volcánicas. La edad de la Luna coincide con las edades de los meteoritos (págs. 146-147), y se remonta a la época de formación del sistema solar.

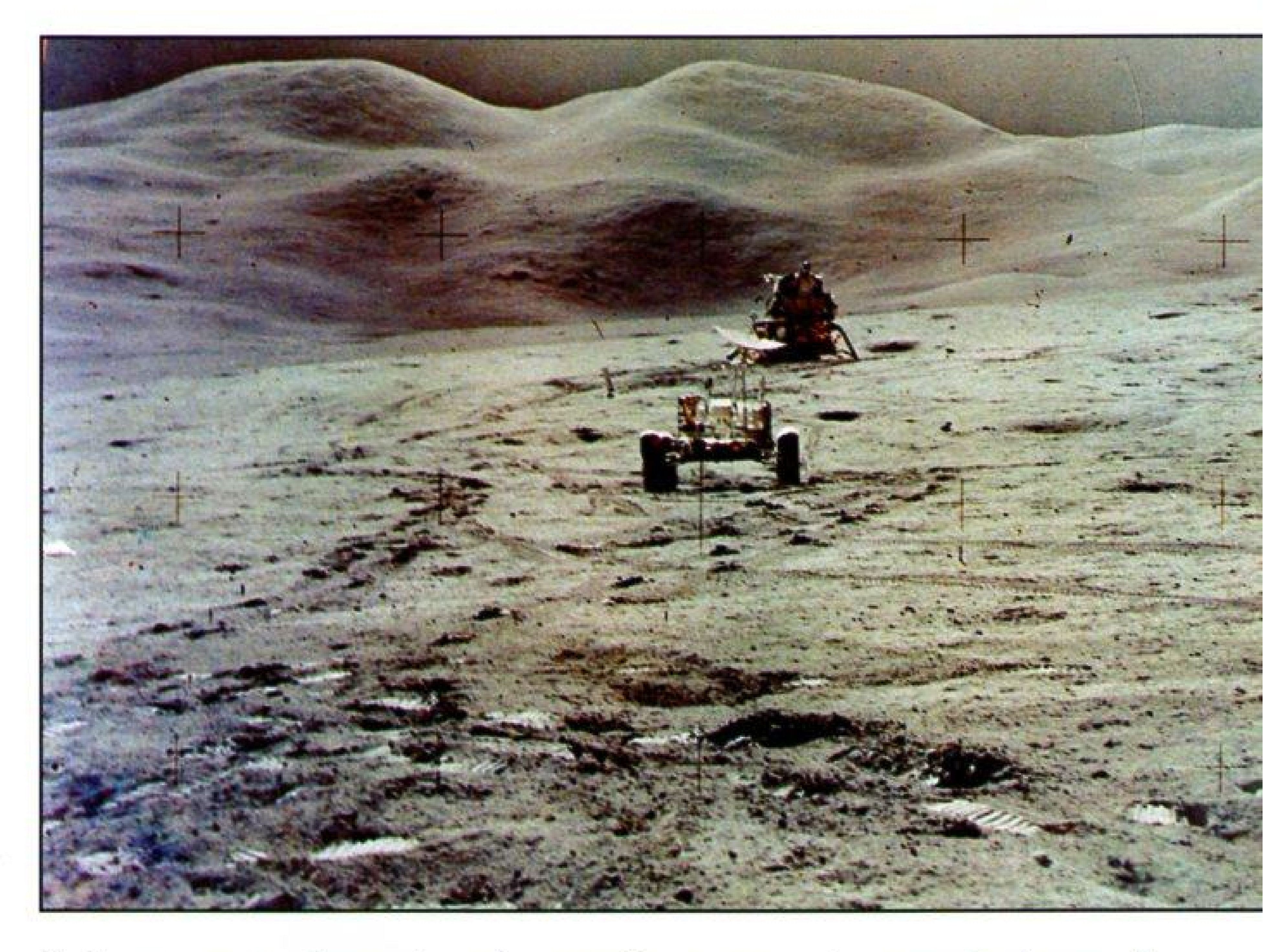
Fue entonces probablemente en la misma época, cuando tuvo lugar el nacimiento de la Tierra y de la Luna.

Lo cierto es que se ha demostrado que durante los primeros cientos de millones de años de su existencia, las capas exteriores de la superficie lunar se hallaban completamente derretidas, hasta una profundidad de varios cientos de kilómetros. Ello se debió bien al violento bombardeo sufrido por parte de otros planetesimales, bien al calentamiento producido por la rápida descomposición de un metal radioactivo denominado aluminio 26.

A medida que se enfriaba, la Luna continuó siendo bombardeada por planetesimales de acaso hasta 250 km de diámetro, creándose así enormes cuencas tales como el Mare Imbrium (Mar de las Lluvias) y el Mare Orientale (Mar Oriental). Hace unos cuatro mil millones de años, este descomunal bombardeo amainó ligeramente, dejando a su paso zonas de tierras altas salpicadas de cráteres y una gruesa cubierta de escombros rocosos. A continuación, el calor producido bajo la corteza por materiales radioactivos tales como el uranio condujo a la fusión de unos 200 km de corteza lunar. Ello dio lugar al surgimiento de grandes ríos de lava que cubrieron la superficie durante unos 500 millones de años, produciendo inmensas llanuras oscuras.

Con posterioridad a esa época de actividad —hace unos 3.100 millones de años— las cosas se calmaron, y desde entonces la Luna tan sólo se ha visto sometida al bombardeo esporádico de materiales mucho más pequeños. Si bien la Luna se halla hoy en un estado mucho más reposado que anteriormente, continúan produciéndose fenómenos sísmicos, así como posiblemente un ligero bombardeo de su superficie.

El descubrimiento de los satélites del resto de los planetas de nuestro sistema solar hubo de esperar hasta la invención del telescopio. Más recientemente, hemos obtenido gran cantidad de información adicional procedente de las naves espaciales *Voyager*. Las pruebas disponibles demuestran que los sa-



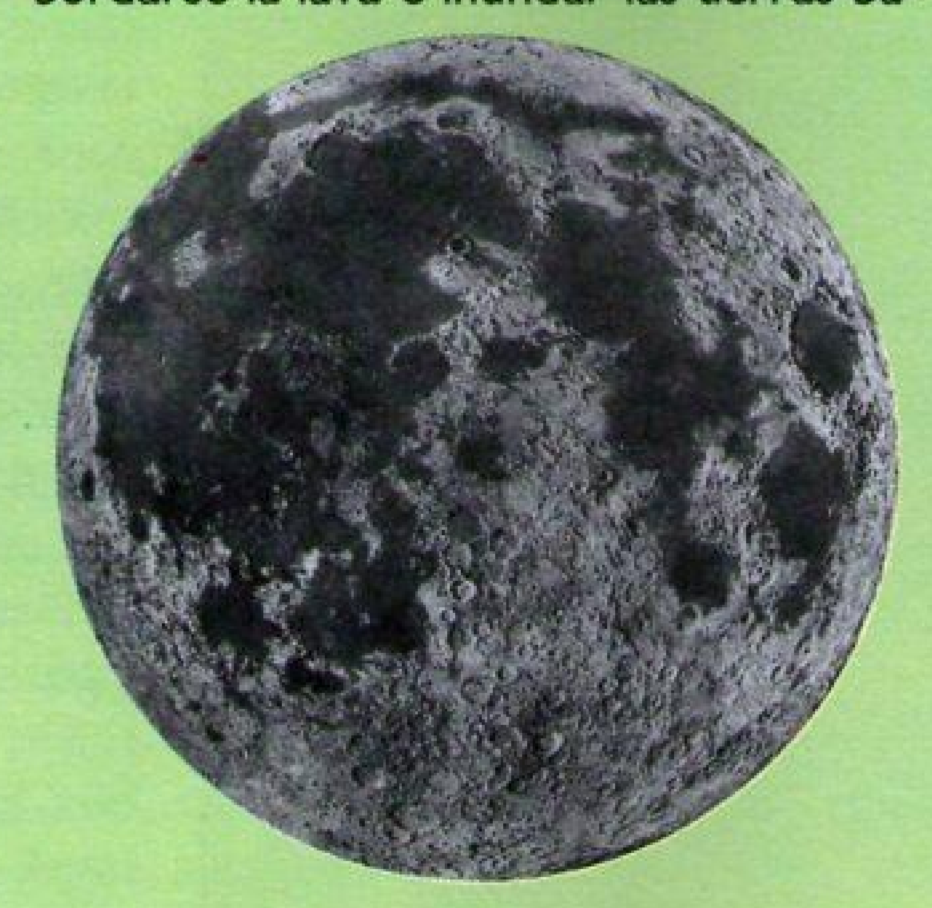
Las montañas lunares *de la región de los Apeninos de Hadley fueron exploradas por los integrantes de la misión del* Apollo XV. *A lo largo de unos 23 km, los astronautas se sirvieron de este vehículo lunar para recoger muestras de rocas.*

El rostro cambiante de la Luna

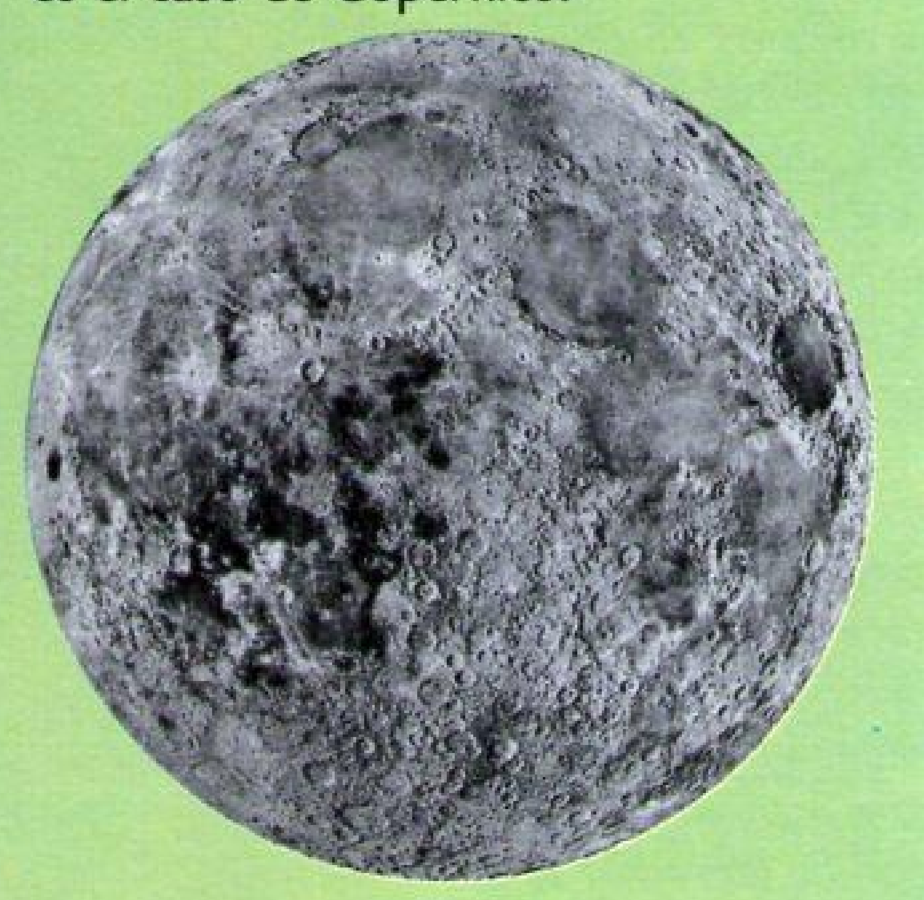
Tras su formación por acreción, la Luna estaba formada por materia derretida. Al enfriarse comenzó a conservar las cicatrices producidas por los meteoritos que la bombardeaban, formas planetesimales de hasta 250 km de diámetro. Así, hace 4.000 millones de años se hallaba ya salpicada de cráteres. Las capas situadas a 200 km de profundidad bajo la corteza se derritieron debido al calentamiento radioactivo. Los mares se formaron al desbordarse la lava e inundar las tierras bajas del satélite. Esto sucedió hace 3.100 y 3.300 millones de años, borrando numerosos cráteres de la faz de la Luna. Desde entonces, algunos fragmentos interplanetarios han formado nuevos cráteres en la superficie de los mares, cual es el caso de Copérnico.



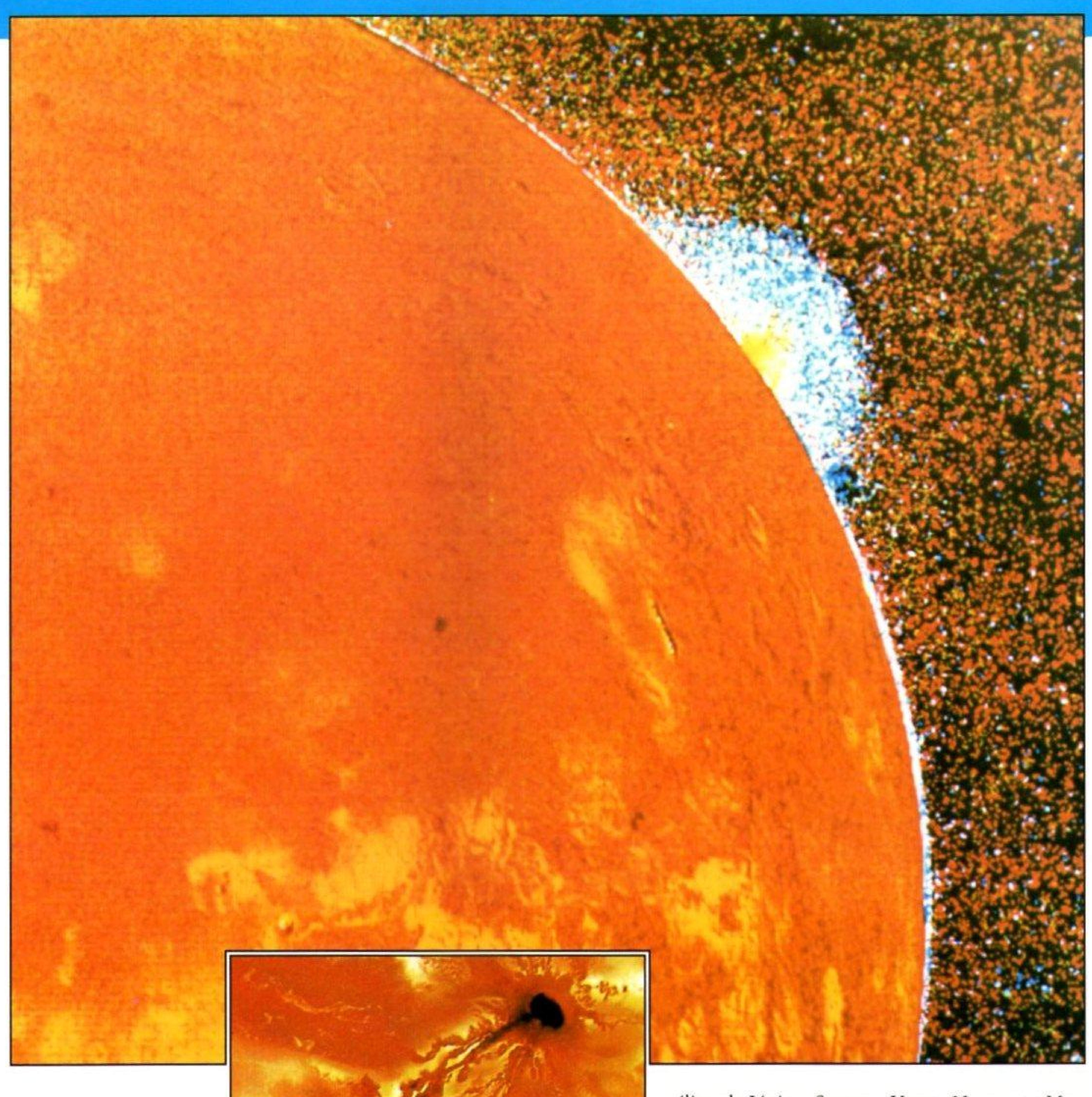
Hace 4.000 millones de años



Hace 3.100 millones de años



La época actual



Los volcanes en erupción *de Ío (arriba) escupen azufre y otras sustancias químicas. Parte de esta materia forma una cola que sigue el recorrido orbital en torno a Júpiter. La actividad volcánica está estimulada por la gravedad de Júpiter, que deforma a Io y genera en su interior un fuerte calentamiento. El color rojo-anaranjado de su superficie (derecha) se debe a compuestos sulfurosos.*

télites de Júpiter, Saturno, Urano, Neptuno y Marte varían considerablemente en cuanto a su tamaño, forma, estructura y rasgos de superficie.

Comencemos por Júpiter: los cuatro grandes satélites descubiertos originalmente por Galileo (Ío, Europa, Ganimedes y Calisto) muestran características asombrosas. De ellos, es quizá Ío —situado en una órbita que lo separa una media de 421.000 km del centro del planeta— el más fascinante.

Dotado de un diámetro de 3.642 km, esto es, algo mayor que la Luna, Ío describe una órbita situada en el plano ecuatorial de Júpiter. Dicha órbita lo conduce al interior de la magnetosfera del astro, lo que hace que este satélite genere mil millones de vatios de potencia eléctrica de un extremo a otro de su superficie. Esta producción de ener-

gía es muy superior a la que podrían alcanzar todas las centrales eléctricas de Estados Unidos juntas, y constituye el motivo por el cual las observaciones de radio realizadas desde la Tierra no tardaron en relacionar las señales recibidas de Júpiter con el desplazamiento orbital de Ío.

El período orbital de Ío es de 1,77 días, es decir, la mitad del siguiente satélite del conjunto, Europa, que gira una vez en torno a Júpiter cada 3,55 días. Ello hace que Europa module periódicamente los efectos mareomotrices que Júpiter ejerce sobre Ío, de tal modo que este último atraviesa series regulares de fuertes efectos gravitatorios que llegan a deformarlo y calentar su interior. El resultado final es que Ío sufre una enorme actividad volcánica.

La superficie de Ío está compuesta por azufre, elemento que a temperaturas muy bajas —apenas 120 K o 153 °C— debería ser de color blanco, y no amarillo como acostumbramos a verlo en la superficie de la Tierra. No obstante, la actividad volcánica y las zonas cálidas existentes en la superficie del satélite llegan a derretir el azufre, lo que hace que éste adopte un tono anaranjado o rojo a medida que se derrama por el exterior. Cuando se enfría y solidifica, dichos colores permanecen inalterados. A ello se deben tanto el espectacular color rojizo de la superficie de Ío como la suavidad de su aspecto. No obstante, también muestra algunos puntos oscuros allí donde las erupciones han calentado el azufre hasta temperaturas de 300 °C.

En cuanto a Europa, es algo más pequeña que nuestra Luna y resulta llamativa por el hecho de que no muestra cráteres producidos por impactos. Por el contrario, se halla cubierto por toda una red de vasos helados. Esta apariencia venosa es el resultado del hielo lodoso que se acumuló e inundó la superficie tras un período de bombardeo por parte de meteoritos (págs. 146-147) acaecido hace unos 4.000 millones de años.

Más lejos, a una distancia media 2,5 veces superior a la de Ío, hallamos el satélite gigante de Júpiter: Ganimedes. Algo mayor que el planeta Mercurio, si bien dotado de menor masa, se halla compuesto por hielo y silicatos en proporciones similares. Su helada superficie está salpicada de cráteres y dividida en dos clases distintas de terreno.

El primero de ellos consta de manchas oscuras en las que abundan los cráteres y las grandes zanjas; entre éstas últimas predomina una segunda clase de terreno formado por franjas de colores pálidos. Las franjas contienen depresiones de varios kilómetros de anchura y cientos de kilómetros de longitud. Los datos obtenidos hasta el momento sugieren que Ganimedes es un satélite antiguo dotado de una superficie que sufrió constantes bombardeos antes de congelarse.



El segundo mayor satélite de Júpiter, Calisto, *posee una «diana» prominente y característica, considerada como una enorme cuenca procedente de algún impacto. La presente imagen, tomada por el* Voyager 1 *desde una distancia de 350 km, muestra detalles de hasta 7 km de diámetro. Calisto se halla compuesto por rocas y hielo, y está cubierto por una sucia envoltura de hielo en la que la temperatura desciende hasta – 153 °C. Posee más cráteres que ninguna de las otras grandes lunas jovianas, y los astrónomos opinan que su superficie es la más antigua de todas ellas.*

El otro gran satélite joviano es Calisto. Es casi tan grande como Ganimedes y de similar densidad, y posee una superficie en la que abundan los cráteres. En su geografía destaca la llamada cuenca de Valhalla, una zona circular de unos 600 kilómetros de diámetro. Dicha cuenca muestra unas 15 cadenas montañosas concéntricas y parece haber sido causada por el impacto de un enorme meteorito o asteroide. La superficie de Calisto podría muy bien ser más antigua aún que la de Ganimedes.

Los satélites de Saturno muestran también diversos rasgos interesantes. Los «satélites pastores», por ejemplo, poseen el efecto de mantener la materia de los anillos en su lugar, evitando que se disperse por el espacio. Más notables, sin embargo, son otros dos satélites menores, Jano y Epimeteo, situados en órbita justamente en el exterior de los anillos.

Ambos trazan órbitas casi idénticas, con tan sólo 50 km de separación entre sus respectivos recorridos. En consecuencia, sus períodos orbitales son muy similares, si bien uno de ellos alcanza al otro cada cuatro años. Pequeños y oblongos, podrían haber chocado hace largo tiempo, cosa que hoy no podrían hacer debido a que, cuando se aproximan, su mutuo efecto gravitatorio les obliga a cambiar de

órbita. El de más rápido desplazamiento pasa a desarrollar el recorrido más lento, y viceversa.

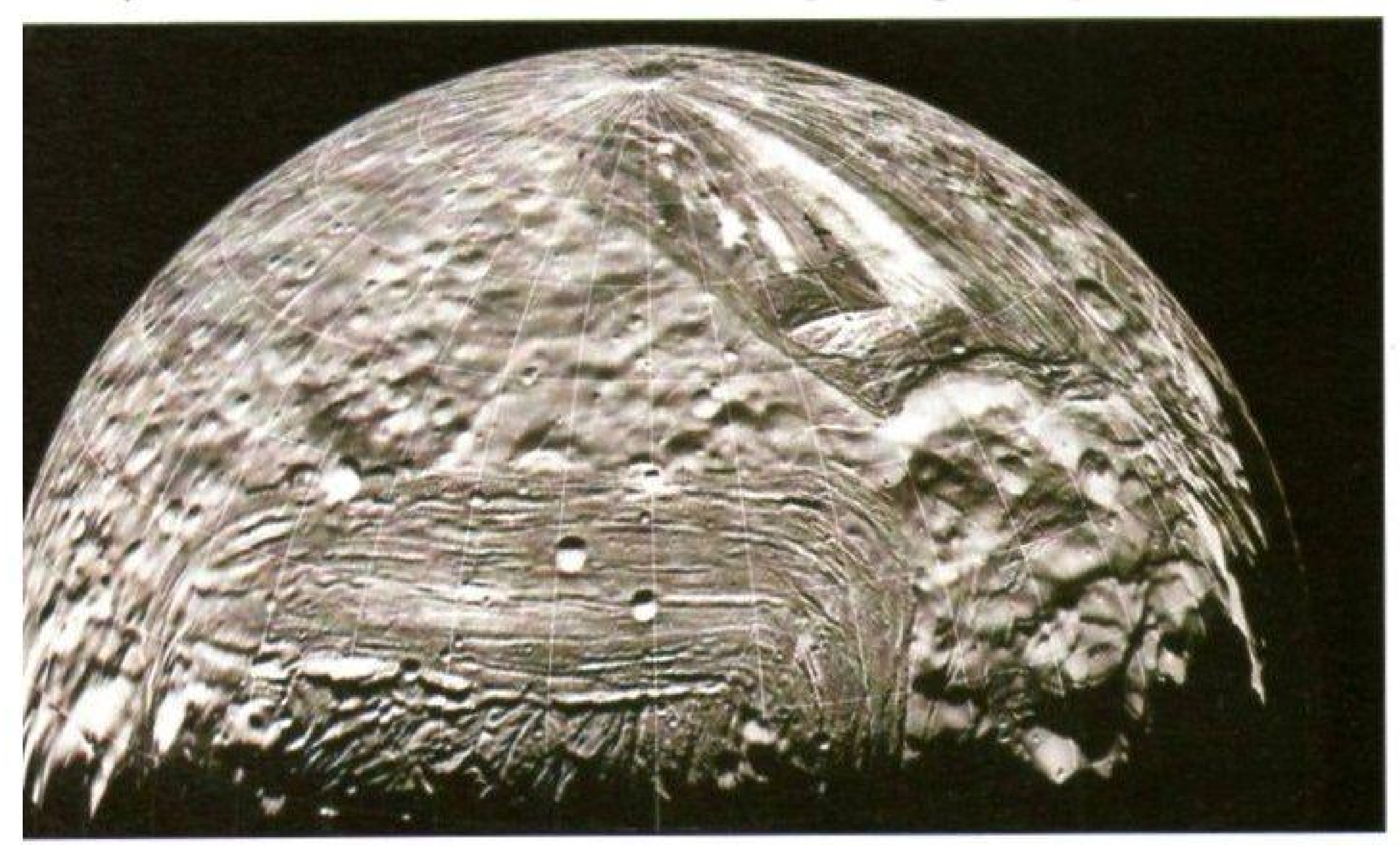
Las formas de estos dos cuerpos llevaron a la suposición de que pudieron en otra época constituir un único satélite del que posteriormente escapó Epimeteo. Acaso ambos fueran originalmente similares al siguiente satélite, Mimas, dotado de una masa ligeramente superior y un diámetro de 398 kilómetros. Compuesto por diversos tipos de hielo, su superficie se halla salpicada de cráteres entre los que destaca uno gigantesco que indica que antiguamente fue golpeado por un cuerpo excepcionalmente grande que estuvo a punto de desintegrarlo.

Encelado, el siguiente satélite de Saturno en lo que se refiere a distancia, continúa constituyendo un misterio. Una parte de él se halla cubierta de cráteres, mientras que la otra es lisa, y también parece haber sufrido un intenso bombardeo que, sin embargo, habría cesado hace al menos 4.000 millones de años, tras lo cual surgieron del interior del satélite grandes cantidades de materia que cubrieron aquella parte de su superficie que hoy se nos presenta como una larga llanura lisa.

Aún más lejos, hallamos otros satélites de gran tamaño: Tetis, dos veces mayor que Encelado; Dione, a su vez algo mayor, con un diámetro de 1.120 km, y Rea, con un diámetro de 1.528 km. Todos ellos presentan cráteres, y Dione muestra asimismo ciertas marcas extrañas de forma deshilachada.

Probablemente, el más intrigante de la familia de satélites con que cuenta Saturno sea el gigante Titán, dotado de un diámetro de 5.150 km, esto es, de 1,5 veces el tamaño de nuestra Luna. Titán es lo suficientemente grande como para retener su propia atmósfera, pero ésta no es sino una especie de niebla anaranjada lo bastante espesa como para oscurecer su superficie por completo.

Miranda, satélite de Urano, *aparece aquí en una imagen retocada obtenida por el* Voyager. *Su diámetro es de 500 km, y es más pequeña y cercana de las grandes lunas del planeta. Su peculiar superficie muestra zonas repletas de cráteres y otras en las que se observan fracturas, surcos y escasos impactos. Los surcos y zanjas alcanzan algunos kilómetros de profundidad.*



Las observaciones por infrarrojos realizadas al paso del *Voyager 2* han mostrado claramente que si bien dicha atmósfera se halla compuesta por un 90 por ciento de nitrógeno, también existen en ella trazas de metano, tal y como ya se suponía a partir de las observaciones terrestres. Sin embargo, contiene asimismo ciertas moléculas orgánicas complejas tales como el etano y el acetileno. El *Voyager 2* descubrió además la presencia de cianuro de hidrógeno, una molécula capaz de combinarse con otras para formar adenina, una de las sustancias componentes de la hélice del ADN, presente a veces en tejidos animales y vegetales.

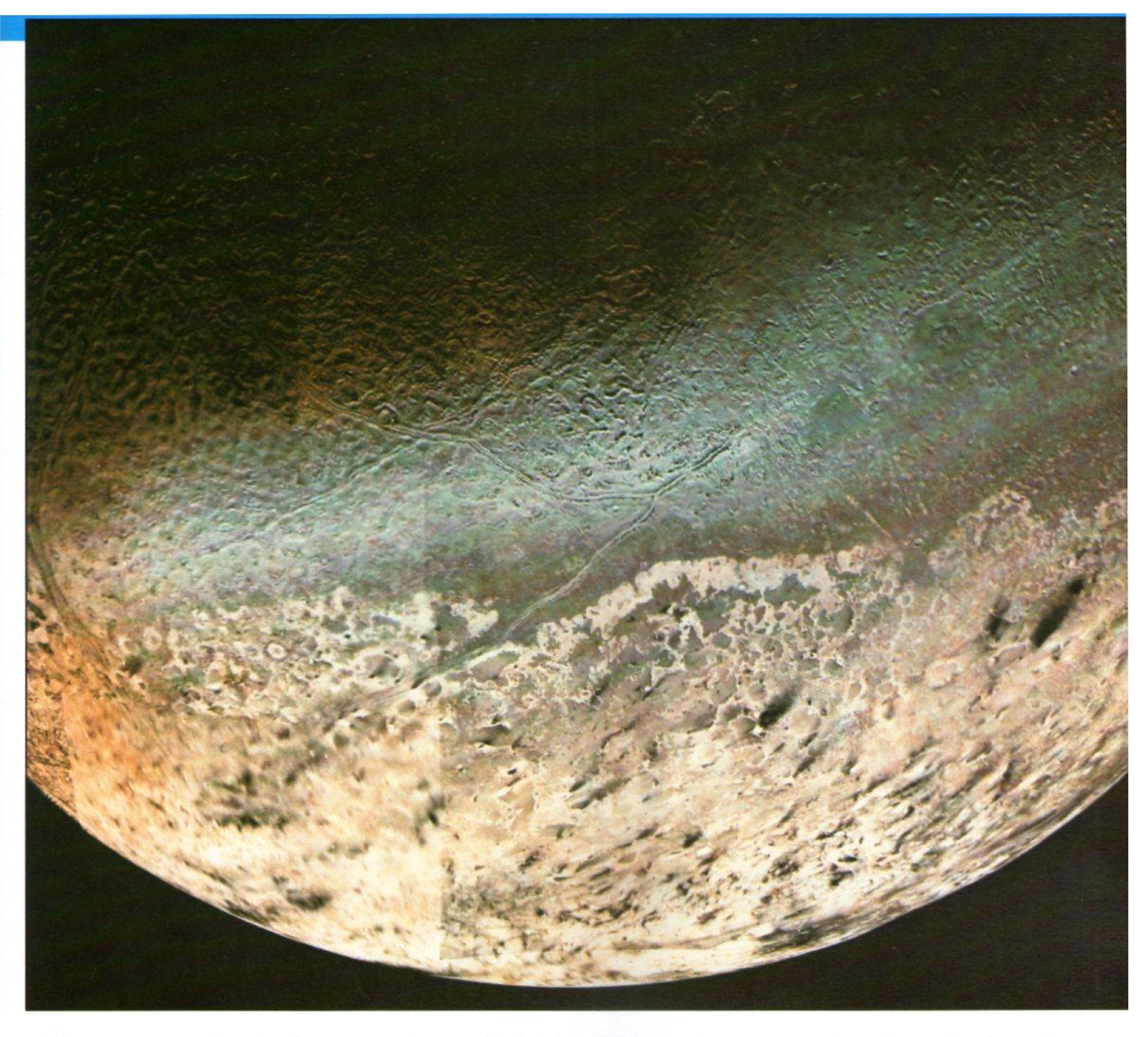
Si bien en Titán no se observa la presencia de agua, lo que permitiría la formación de sustancias tales como los aminoácidos (págs. 156-161), podría ocurrir que Titán se encontrara en un estado previo a la producción de vida similar al que en su día atravesó la Tierra. De ser así, su estudio podría conducir a una comprensión más profunda del proceso que dio lugar a la vida en nuestro planeta.

Más allá de Titán se encuentra Japeto, dotado de un diámetro de 1.436 km y también cubierto de cráteres. El más alejado del planeta es Febe, cuya extraña órbita sugiere un origen distinto al del resto de los satélites de Saturno (pág. 134).

La mayor parte de los 15 satélites de Urano es de tamaño reducido —apenas 160 km de diámetro—, pero los más grandes —Miranda (472 km), Ariel (1.158 km), Umbriel (1.169 km), Titania (1.578 km) y Oberón (1.523 m)— resultan de gran interés. Las imágenes obtenidas de los cinco por el *Voyager 2* muestran que se hallan compuestos por hielo y roca; ésta, debido a su mayor peso, se ha hundido hacia el interior. Todos ellos muestran superficies oscuras y abundantes en cráteres.

Las imágenes más detalladas obtenidas del más pequeño de todos ellos, Miranda, han revelado que posee una superficie peculiar. Si bien muestra cráteres en casi toda su extensión, posee también dos zonas casi rectangulares que parecerían haber sido alisadas con el borde de un gigantesco cuchillo. Una de ellas se halla cubierta de líneas, mientras que la otra aparece adornada por materiales más ligeros.

Los geólogos planetarios han sugerido que Miranda, el más cercano a Urano de sus grandes satélites, resultó partido en otra época y orbitó en pedazos en torno al planeta durante un período tras el cual los diversos trozos se habrían soldado de nuevo. De ser correcta, esta interpretación podría explicar la causa del peculiar eje de rotación de Urano (págs. 128-129). Podría muy bien haber ocurrido que grandes trozos de material se desplomaran sobre la superficie del planeta, causando no sólo su actual inclinación, sino la descomposición de Miranda.



***El casquete polar sur** de Tritón, el gran satélite de Neptuno, posee una elevada capacidad reflectante y muestra un color rosado. Se compone de nitrógeno helado depositado durante su larguísimo invierno. Lejos del casquete, la superficie se torna más oscura y rojiza. Dicha coloración puede deberse a la radiación ultravioleta y a partículas cósmicas con carga eléctrica que alterarían el metano de la atmósfera y la superficie.*

Neptuno tiene un solo satélite de gran tamaño, Tritón, dotado de un diámetro de 2.720 km. Tritón es un lugar extraordinariamente frío, cuya temperatura apenas alcanza los 37 K. Incluso el nitrógeno líquido es más cálido que la superficie de este satélite. Su superficie se halla cubierta por agua congelada envuelta a su vez por una capa de metano e hidrógeno helados. El hielo de nitrógeno forma una envoltura transparente de aproximadamente un metro de espesor.

Los polos de Tritón se hallan inclinados a unos 160 grados con respecto al ecuador de Neptuno. Dado que su órbita tiene una duración de 5,9 días, uno de sus polos apunta al Sol durante cada medio año neptuniano, esto es, 82,4 años terrestres, tras lo cual se ve sustituido por el otro. Como resultado, la noche de Tritón dura aproximadamente lo que la vida de un ser humano. Durante este período, el hielo se acumula hasta alcanzar aproximadamente un metro y medio de espesor.

Las únicas dos lunas en forma de patata que giran en torno a Marte son diminutas: Deimos tiene tan sólo 15 km de diámetro, frente a los 27 km con que cuenta Fobos. Deimos tarda 1,26 días en completar su órbita, mientras que Fobos apenas tarda 7 horas y 39 minutos, por lo que sale y se pone tres veces al día. Acribillados ambos por bombardeos de meteoritos, no son tanto lunas propiamente dichas como pequeños asteroides capturados por la órbita del planeta.

En definitiva, la diversidad y variedad de los numerosos satélites del sistema solar transluce la existencia de varios procesos diferentes de formación y de captura por parte de sus respectivos planetas.

ASTEROIDES

• *Los planetas menores*

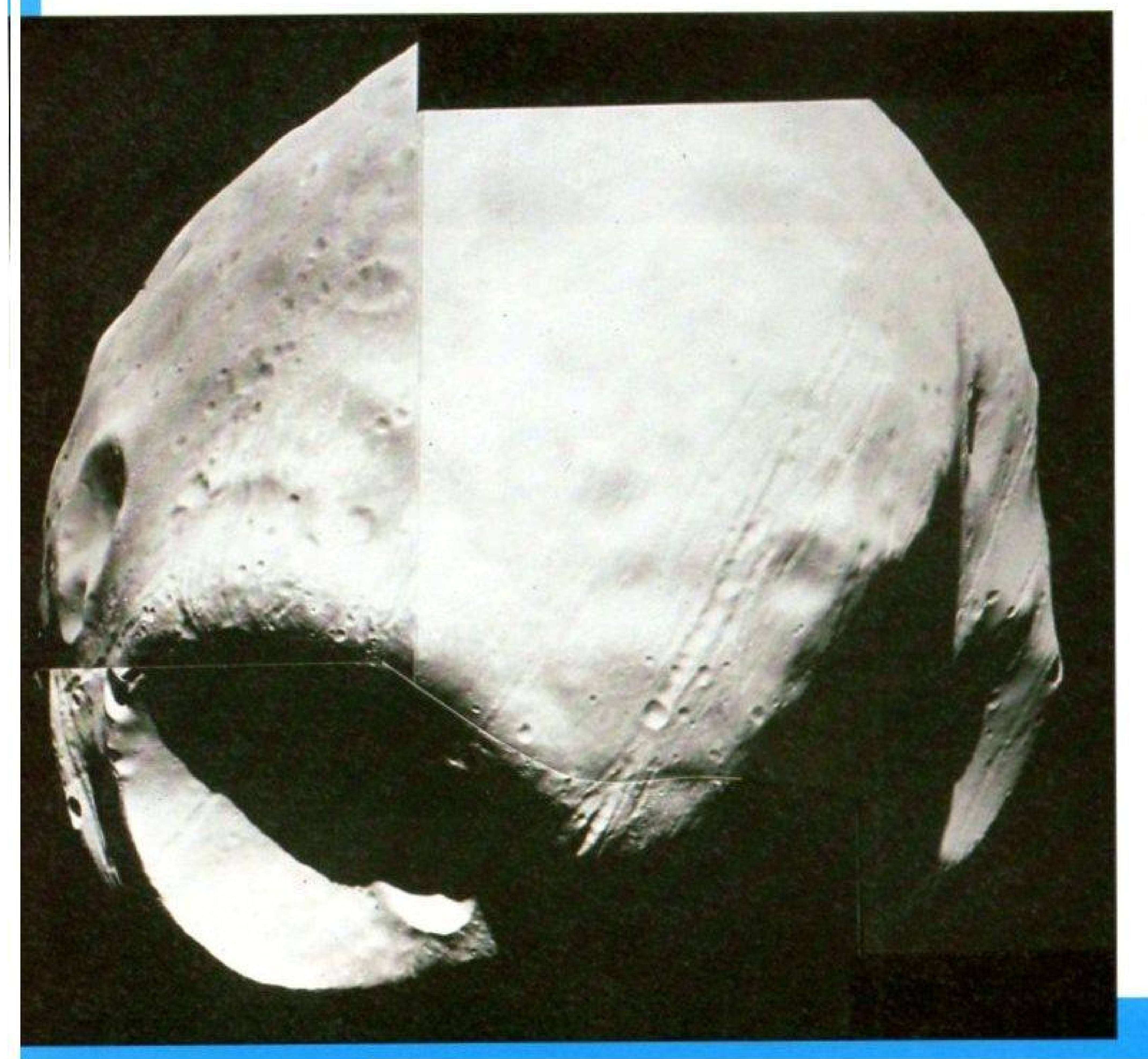
Los asteroides tienen un aspecto similar al de las lunas de Marte: *pequeños, con forma de patata y recubiertos de cráteres. Fobos (abajo) es el mayor de los satélites marcianos, y posee un diámetro de 28 km en su parte más ancha. Aquí podemos verlo en una imagen de mosaico elaborada a partir de fotografías obtenidas por las naves espaciales* Viking. *De hecho, tanto Fobos como su compañero Deimos no son sino asteroides capturados por la fuerza gravitatoria del planeta.*

Los asteroides, cuerpos a los que en ocasiones nos referimos con el nombre de «planetas menores», son pequeños trozos de materia planetesimal situados en órbita alrededor del Sol. El primero de ellos fue descubierto en 1801, pero para entonces los astrónomos ya llevaban 16 años de búsqueda como consecuencia del descubrimiento de Johann Titius, según el cual la distancia de los planetas al Sol guardaba una relación numérica.

Titius halló que tras escribir las cifras 0, 3, 6, 12, 24, 48, 96 y 192 (cada una de las cuales es el doble de la anterior) y añadir 4 a cada una de ellas, la serie de números final era 4, 7, 10, 16, 28, 52, 100 y 196. Observó que si consideraba la distancia de la Tierra al Sol como 10 unidades, el número 4 representaba la distancia de Mercurio, el 7 la de Venus, etc. Según esta escala, la distancia del Sol a Marte era de 16 unidades. El 52 representaba la distancia a Júpiter y el 100 la distancia a Saturno. Los números 28 y 196 no representaban nada.

Titius publicó su relación como nota a pie de página en una traducción alemana de un libro científico escrito en francés, nota que fue rescatada por Johann Bode, un joven astrónomo a quien llamó la atención. De este modo, terminó por conocerse como Ley de Bode, o ley de Titius-Bode.

Cuando William Herschel descubrió la existencia de Urano en 1781, se observó que la distancia que lo separaba del Sol encajaba con el número 196 de la ley de Bode. Bode ya había sugerido mucho antes que debía existir un planeta entre Marte y Júpiter cuya distancia al Sol correspondiera al número 28.



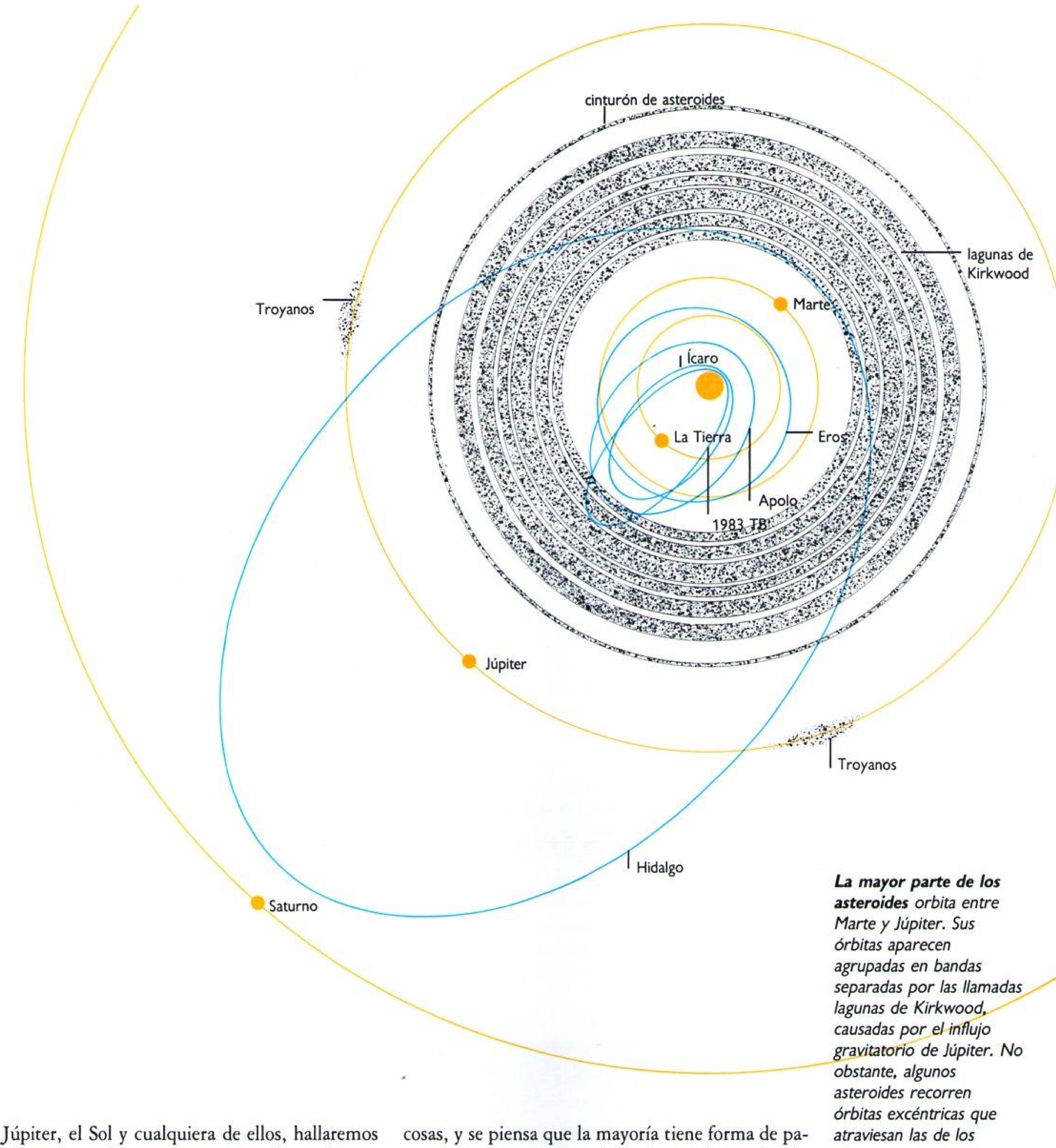
Por último, en 1785, el barón húngaro Xavier von Zach comenzó la búsqueda del planeta ausente. A pesar de su insistencia, no obtuvo resultado alguno durante los primeros 15 años, y ni siquiera el esfuerzo conjunto que organizó en 1800 obtuvo éxito. De hecho, fue Giuseppe Piazzi quien, en 1801, detectó el planeta «perdido» en la zona prevista mientras elaboraba un catálogo estelar. El astro recibió el nombre de Ceres en honor de la diosa de Sicilia, de donde Piazzi era oriundo.

Tras el descubrimiento de Ceres, comenzó a observarse la existencia de otros planetas mortecinos situados en órbita entre Marte y Júpiter. Cada uno de ellos parecía una diminuta cabeza de alfiler, y todos eran demasiado pequeños como para discernir en ellos la forma de un disco. Por fin, en 1802, se acuñó el término *asteroide* para referirse a ellos. Actualmente se conocen miles, pero tan sólo 33 de ellos superan los 200 km de diámetro, y no todos mantienen su órbita entre Marte y Júpiter.

Aquellos que lo hacen no distribuidos uniformemente a lo largo de una franja determinada, sino que forman grupos separados entre sí por pequeños huecos llamados lagunas de Kirkwood. Estos están causados por la influencia gravitatoria de Júpiter, planeta al que hoy se considera responsable de que la materia planetesimal no haya logrado formar astro alguno entre él y Marte.

Los cálculos realizados muestran que los desechos planetesimales sólo se agrupan en órbitas razonablemente estables cuando se hallan separados de los planetas principales. El hueco existente entre Marte y Júpiter no es único en el sistema solar. Las teorías actuales predicen que existe otro en el interior de la órbita de Mercurio, si bien no ha podido determinarse con seguridad si hubo allí meteoritos en los primeros días del sistema solar.

Algunos asteroides se hallan tan afectados por la influencia de Júpiter que han pasado a describir la misma órbita de éste alrededor del Sol. No se han convertido en satélites jovianos propiamente dichos, sino que se trasladan alrededor del Sol en la distancia 52 de Bode. Estos asteroides permanecen unidos formando dos grupos denominados *Troyanos*. Cada grupo mantiene una considerable separación de Júpiter, y si trazamos líneas imaginarias en-



***La mayor parte de los asteroides** orbita entre Marte y Júpiter. Sus órbitas aparecen agrupadas en bandas separadas por las llamadas lagunas de Kirkwood, causadas por el influjo gravitatorio de Júpiter. No obstante, algunos asteroides recorren órbitas excéntricas que atraviesan las de los planetas interiores y exteriores. Ícaro, por ejemplo, se acerca considerablemente al Sol, mientras que la órbita de Hidalgo alcanza casi la de Saturno. Los Troyanos son dos grupos de asteroides que giran a unos 60 grados por delante y detrás de Júpiter.*

tre Júpiter, el Sol y cualquiera de ellos, hallaremos que forman en el espacio un triángulo equilátero. Uno de los grupos se desplaza por delante del planeta, mientras que el segundo ocupa la retaguardia.

Aproximadamente el 5 por ciento de los asteroides mantiene órbitas excéntricas que atraviesan las de la Tierra, Marte, Júpiter y Saturno. En el caso de Quirón, su órbita atraviesa también la de Urano. Si bien es posible que cualquiera de estos asteroides chocara con alguno de los planetas telúricos, la probabilidad de que ello suceda es escasa.

Los asteroides muestran el aspecto de masas rocosas, y se piensa que la mayoría tiene forma de patata o bien son cuerpos alargados similares a las diminutas lunas marcianas, Fobos y Deimos. De hecho, si hemos de juzgar según éstas, los asteroides poseerían bordes desconchados e incluso mostrarían la existencia de cráteres producidos por colisiones con otros cuerpos del sistema solar. Los asteroides difieren entre sí en cuanto al color debido a la presencia de los diversos minerales y sustancias químicas que tienen agua en su composición. Ello revela de modo indudable que sus superficies son de lo más dispar.

COMETAS

• *Los visitantes del espacio exterior*

Las órbitas de los cometas en torno al Sol *describen enormes elipses. Los cometas desarrollan colas cuando se acercan lo bastante al Sol y parte del material que los integra se evapora o desgaja de ellos. Todo cometa posee dos colas, una formada por polvo y otra por plasma o gas ionizado. La de polvo adquiere un tinte amarillento bajo la luz solar, mientras que la de gas suele ser azulada. Ambas alcanzan su mayor brillantez durante el perihelio (punto de máximo acercamiento al Sol). Durante el afelio (momento de mayor alejamiento del Sol), los cometas son trozos inertes de polvo y hielo.*

Uno de los espectáculos más asombrosos que nos ofrece la noche es la perspectiva de la brillante cabeza y la larga y reluciente cola de los cometas. En las épocas en las que dominaba la astrología y cualquier fenómeno celestial se consideraba como un presagio de acontecimientos futuros, los cometas eran contemplados como signos ominosos.

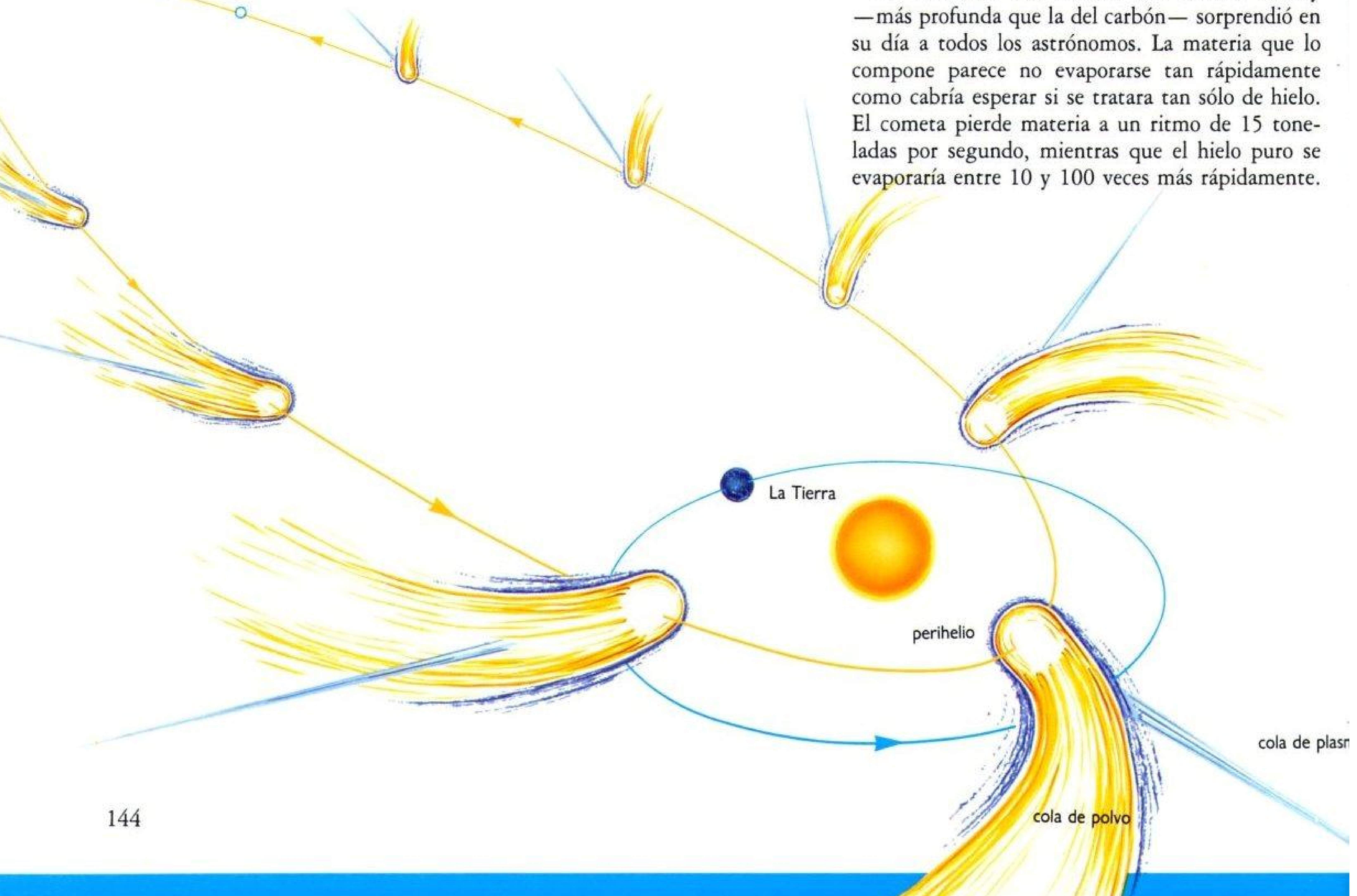
Hoy día sabemos que los cometas tan sólo ofrecen una visión espectacular en aquellas ocasiones en que su órbita los acerca al Sol. Cuando se hallan en los extremos de sus órbitas excéntricas, resultan demasiado pequeños y reflejan demasiada poca luz solar como para resultar visibles.

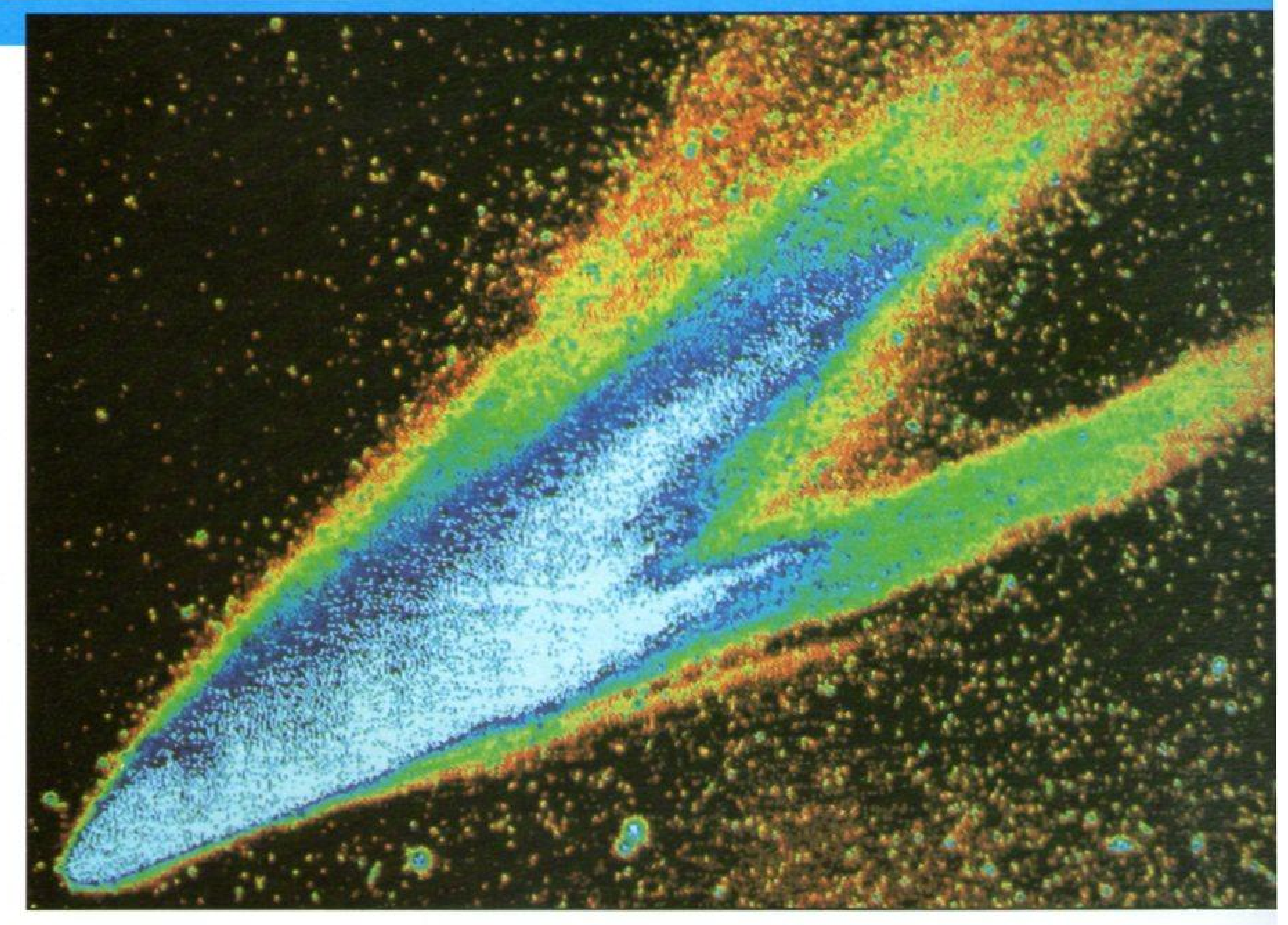
De hecho, los cometas sólo pueden observarse a lo largo de una pequeña sección de las órbitas que describen en el cielo nocturno. Durante largos años, existió una gran controversia con respecto al grado de rectitud de sus trayectorias o al trazado de las mismas en el caso de ser curvadas. Por fin, la confirmación final de sus órbitas elípticas llegó en 1758 tras el regreso del brillante cometa de 1680 según ya había predicho Edmond Halley, quien había basado sus cálculos en las teorías newtonianas.

El llamado cometa Halley ha realizado numerosas apariciones desde entonces. En 1986, con ocasión de su última aproximación al Sol, fue objeto de investigación por parte de numerosas sondas espaciales, una de las cuales llegó a penetrar en su interior.

Los cometas se componen de materia que podría haberse formado en el interior de las nebulosas solares. Son aglomeraciones de gases y polvo en estado de congelación. El cometa Halley no es una excepción. Es bastante probable, que se trate de un cometa típico en la medida en que posee un núcleo central alargado y dotado de la misma forma de patata de los asteroides y de no más de 15 km de longitud y 8 km de anchura y espesor respectivamente. Posee una superficie oscura y un ritmo de rotación de 52 horas de duración, lo que resulta lento cuando se aproxima al Sol. Debido a ello, el costado iluminado se recalienta y se produce una evaporación de hielo y polvo del núcleo. Se trata de un fenómeno experimentado por todos los cometas cuando se aproximan a su perihelio (o punto más próximo al Sol).

La oscuridad del núcleo del cometa Halley —más profunda que la del carbón— sorprendió en su día a todos los astrónomos. La materia que lo compone parece no evaporarse tan rápidamente como cabría esperar si se tratara tan sólo de hielo. El cometa pierde materia a un ritmo de 15 toneladas por segundo, mientras que el hielo puro se evaporaría entre 10 y 100 veces más rápidamente.





Las colas gemelas del cometa West *aparecen aquí en una imagen coloreada realizada en 1976. La cola superior, más ancha, se halla compuesta de polvo procedente de la cabeza de «nieve sucia» del cometa. El polvo se ve impulsado hacia el exterior de la misma por la presión de la luz solar. La cola inferior es de gas ionizado, y se mueve transportada por el viento solar.*

De ello han deducido los astrónomos que el núcleo debe hallarse cubierto por un manto de materia oscura y porosa de varios centímetros de espesor. Dicha materia podría ser demasiado pesada como para resultar despedida, o al menos demasiado gruesa como para alcanzar velocidad de escape, de tal modo que volvería a caer sobre el núcleo antes de separarse demasiado de él. En efecto, tan sólo pequeñas partes de la superficie del núcleo han despedido materia en dirección al espacio, mientras que otras partes han permanecido inertes.

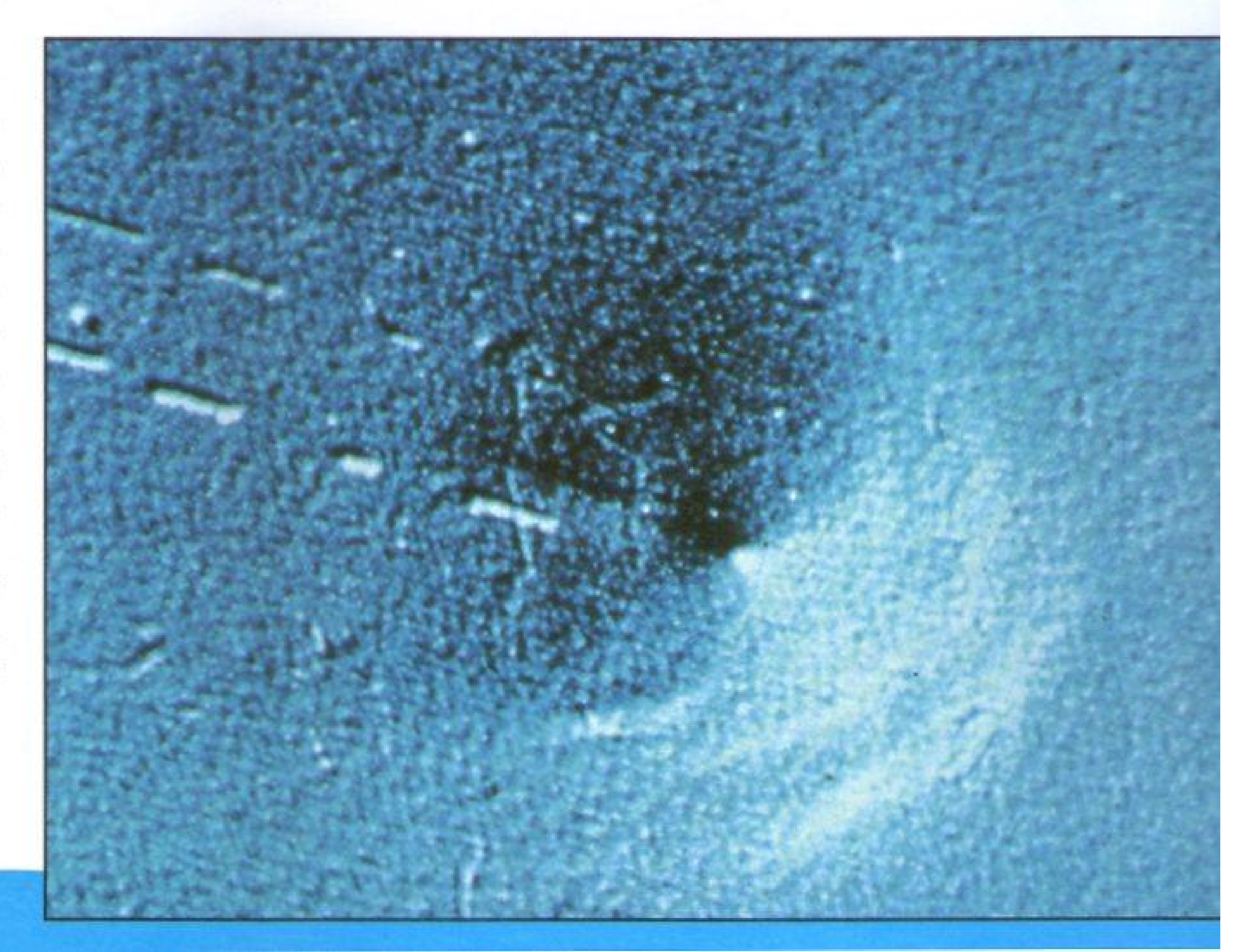
En cualquier caso, el cometa Halley, al igual que todos los demás, pierde parte de la sustancia que lo integra cada vez que pasa por el perihelio, y ciertos cálculos sugieren que ha debido de perder unos 300 millones de toneladas desde su aparición 1986. Así y todo, su núcleo aún debería conservar unos 10.000 millones de toneladas o más, lo que permitirá que reaparezca todavía muchas veces.

Los materiales que componen el núcleo del cometa Halley son elementos minerales tales como carbono, calcio, hierro, magnesio, oxígeno, potasio y silicio. Además, la nave *Giotto* demostró que había numerosos elementos ligeros, especialmente hidrógeno y nitrógeno. Pero el material más extendido era una combinación de elementos ligeros y pesados que había dado lugar a la formación de moléculas orgánicas. La presencia de las mismas sugiere que tanto el cometa Halley como otros no se han originado en el cinturón de Oort (pág. 106), sino que proceden del espacio interestelar.

Las colas de los cometas se hallan generadas por dos mecanismos distintos que las obligan a apuntar siempre en dirección contraria al Sol. El primer mecanismo es la presión de radiación solar actuando sobre el polvo del cuerpo del cometa, que arrastra al polvo hasta generar una cola, especialmente a medida que se aproxima el perihelio. Las partículas de polvo forman una larga y brillante cola que suele mostrar una ligera curvatura debido a que el material expulsado en primer lugar se «retrasa» con respecto al que surge a continuación, a medida que el cometa aumenta su velocidad al acercarse al perihelio. Tales colas de polvo reflejan la luz solar y adoptan un tono amarillento.

En el segundo mecanismo, los gases ionizados emitidos por el cometa son arrastrados por el viento solar formando una cola recta. Dado que la mayor parte de su radiación obedece al monóxido de carbono ionizado, dichas colas adoptan una coloración azulada.

Núcleo del cometa Halley *en una imagen computerizada tridimensional realizada a partir de fotografías tomadas en 1910. Los brillantes arcos de gas que se observan frente a ella forman la coma, un reluciente halo que rodea el núcleo. La coma se halla compuesta por moléculas de agua ionizadas por la radiación ultravioleta del Sol.*



METEORITOS

• *El polvo cósmico*



El Meteor Crater, de Arizona, *posee una antigüedad de entre 25.000 y 40.000 años. Se halla bien preservado debido a que el clima del noreste de Arizona es extremadamente seco, por lo que apenas se produce erosión. Posee 800 metros de diámetro y 200 metros de profundidad. Se piensa que es el resultado del impacto de un meteorito rico en hierro y de miles de toneladas de peso que se desintegró en gran parte por la violencia del impacto. El fragmento más pesado que ha podido encontrarse pesaba 635 kg.*

Las estrellas llamadas «fugaces» constituyen un espectáculo familiar para todas las civilizaciones, si bien no se trata de estrellas propiamente dichas, sino de meteoritos. La mayor parte de los meteoritos son, de hecho, restos de cometas. En su camino en torno al Sol, los cometas emiten gas y polvo y dejan a lo largo de la órbita un rastro formado por diversos materiales. Por fortuna, los cometas rara vez chocan con nuestro planeta, pero la Tierra atraviesa sus órbitas con cierta frecuencia.

Cuando esto ocurre, restos de polvo mineral y rocoso son absorbidos por la atmósfera terrestre, y calcinados por la fricción con las moléculas del aire. Ello produce la ionización de las mismas y su radiación. Así, las colas fugaces son la consecuencia de cada nuevo trozo de material que entra.

Cada vez que la Tierra atraviesa la órbita de un cometa, el resultado no es la aparición de uno o dos meteoritos, sino a menudo de miles de ellos. Estas «lluvias» de meteoritos pueden llegar a constituir espectáculos sumamente llamativos. Todos los meteoritos parecen provenir de un punto del firmamento que llamamos radiante, y la constelación de la que proceda el mismo dará su nombre a la lluvia. Así, tenemos las Perseidas, cuyo radiante se encuentra en Perseo; las Leónidas, procedentes de Leo, y así sucesivamente. No obstante, los radiantes no son sino un efecto de la perspectiva, y tan sólo indican la dirección estelar de la que procede cada lluvia de meteoritos.

No todos proceden de restos de cometas. Existen también meteoritos esporádicos que vienen de todas las direcciones del espacio, se componen de polvo y rocas provenientes de la nebulosa solar y describen su propia órbita en torno al Sol. En una noche, se pueden ver a simple vista unos diez cada hora.

Estos restos estelares penetran en la atmósfera terrestre a velocidades que oscilan entre los 11 y los 74 kilómetros por segundo. El rastro que dejan a su paso dependerá de la cantidad de materia que contengan, desde simples partículas de polvo a grandes bloques rocosos. La longitud de los rastros oscila entre 7 y 20 kilómetros.

En las raras ocasiones en que la atmósfera terrestre resulta perforada por grandes trozos de materia rocosa, el rastro puede ser lo bastante brillante como para iluminar el paisaje y proporcionar al meteorito el aspecto de una reluciente bola de fuego.

La mayor parte de la materia que compone los meteoritos se consume al contacto con la atmósfera terrestre, pero en algunas ocasiones dicha combustión no es completa, lo que hace que lleguen a aterrizar trozos del mismo sobre la superficie. El examen de estos cuerpos suministra importantes datos relativos a la formación y composición de los asteroides de los que probablemente proceden.

Los meteoritos se clasifican en tres tipos básicos: metálicos, litosideritos y condritos. Existe asimismo otro grupo: los acondritos. Los metálicos se hallan fundamentalmente compuestos por hierro y níquel. La proporción de este último metal varía: mientras algunos contienen un 6 por ciento, otros pueden llegar a contener entre un 8 y un 20 por ciento. Los metales se encuentran en estado de cristalización, lo que demuestra que los asteroides de los que proceden atravesaron un período de lento enfriamiento o de súbita solidificación.

Los litosideritos están compuestos por materiales metálicos y silicatos superpuestos. Pueden clasificarse a su vez en dos tipos, mesosideritos y palasitos. En los primeros, los silicatos se hallan compuestos fundamentalmente por feldespato (un silicato de aluminio) y piroxenos (silicatos de hierro, magnesio y calcio). Ello indica que los asteroides de los que provienen obtuvieron sus componentes metálicos después de haberse solidificado.

Los palasitos contienen gran cantidad de olivino (un silicato de hierro y magnesio). Probablemente, se formaron tras la intrusión de un líquido metálico entre el núcleo y el manto de olivino del asteroide del que proceden.

Los condritos o meteoritos pétreos contienen pequeñas partículas esféricas o «cóndrulos» de los que deriva su nombre. Dichas partículas contienen hierro, feldespatos, olivino y piroxenos, por lo que son químicamente similares a numerosas rocas terrestres. Existe un subgénero de condritos, conocido con el nombre de condritos carboníferos, que se hallan compuestos de una mezcla de cristales ricos en carbono y olivino con piroxeno, metales, cristales y —en este sentido únicos— láminas de mica.

Finalmente, los acondritos no contienen cóndrulos, tal y como su nombre indica. Son muy similares a las rocas lunares.

Así, el estudio de los meteoritos nos proporciona datos acerca de la naturaleza química de la nebulosa solar existente hace unos 4.500 millones de años. Para entonces, el hierro y otros átomos pesados habían sido sintetizados, presumiblemente en el interior de las primeras estrellas, las cuales, ya convertidas en supernovas, distribuyeron su materia a lo largo del espacio interestelar.

La lluvia de las Gemínidas *tiene lugar todos los años durante la segunda semana de diciembre. Las líneas cortas indican la trayectoria de las estrellas, mientras que las largas corresponden a los meteoritos. La noche del 14 de diciembre caen unos 58 meteoritos por hora.*



EL UNIVERSO VIVIENTE

Desde el instante del *Big Bang,* hace al menos 15.000 millones de años, el universo se ha desarrollado hasta convertirse en la vasta masa de galaxias en expansión que hoy conocemos y que se extiende a lo largo del espacio hasta alcanzar distancias que ni los más sofisticados instrumentos modernos pueden medir. En la inmensidad de este universo, la Tierra es una mera mota rocosa situada en órbita alrededor de una de las estrellas menos importantes. No obstante, los hallazgos de la ciencia moderna han llevado a algunos astrónomos y físicos a la opinión de que el género humano representa la obra cumbre del cosmos.

En nuestro sistema solar, tan sólo el planeta Tierra contiene vida. En ese sentido, desde luego, resulta único. Según parece, tan sólo aquí se han producido condiciones apropiadas para la existencia y evolución de formas de vida complejas e inteligentes. Esta vida, basada esencialmente en las versátiles propiedades químicas del elemento carbono, ha conducido tras millones de años a la asombrosa aparición de una especie autorreproductora, altamente elaborada y comunicativa: el *Homo sapiens.*

El abanico de formas de vida existentes en la Tierra es tan vasto que los científicos han llegado incluso a dudar que el tiempo transcurrido desde el *Big Bang* pudiera haber bastado para producir tal evolución. Una explicación alternativa del auge de la vida sobre la Tierra podría hallarse en la posible llegada de moléculas complejas procedentes del espacio exterior, que habrían estimulado el proceso evolutivo.

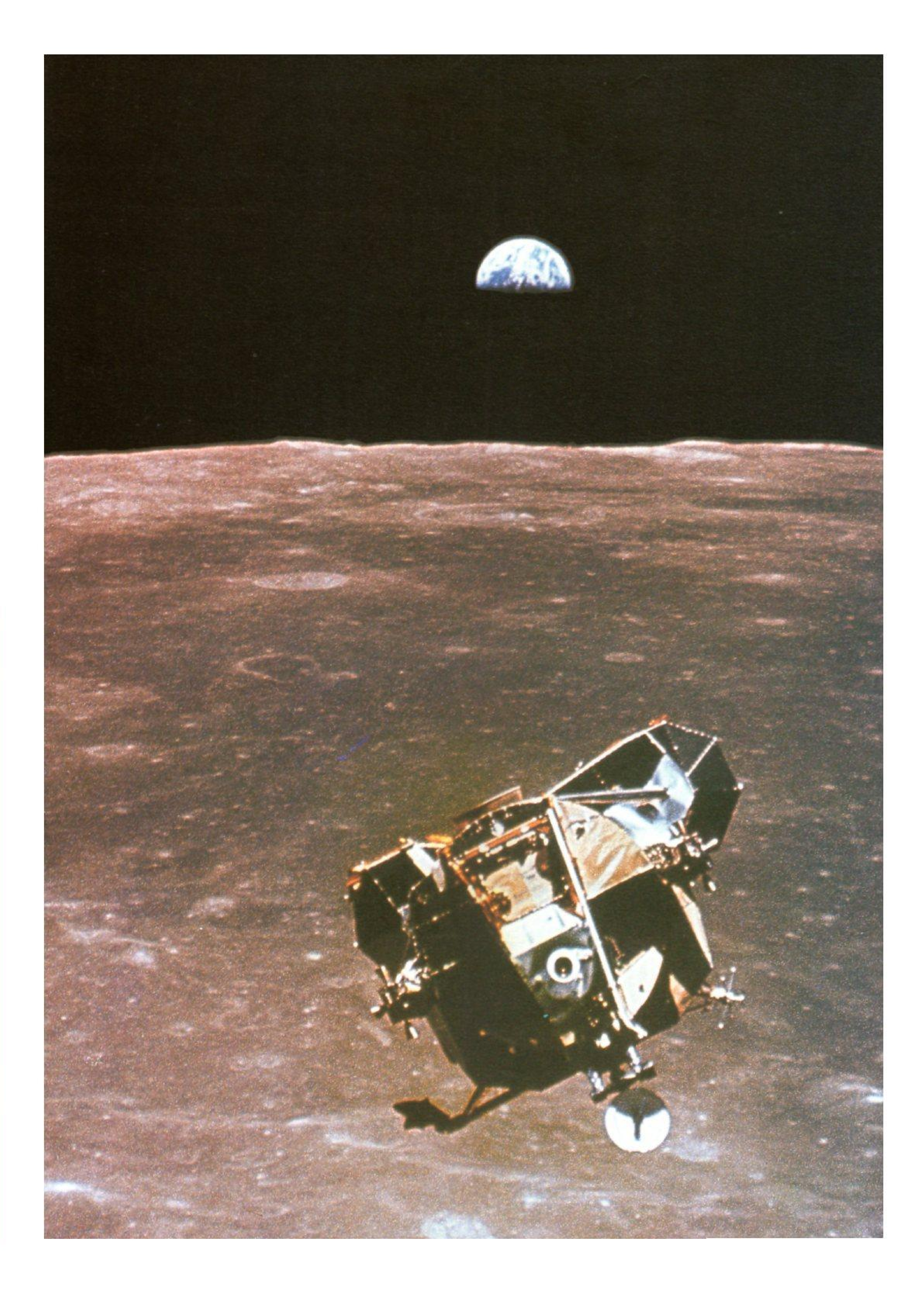
Las características del ser humano le sitúan en el pináculo de la evolución. Aunque se trata de un punto discutible, la más importante de estas características es su capacidad para comunicarse, no sólo por medio de lenguajes alfabéticos sino a través del simbolismo universal de la matemática. Sin embargo, ¿somos realmente los humanos los únicos seres inteligentes del universo? De no ser así, el establecimiento de comunicación con civilizaciones extrañas a nuestro planeta no sólo es deseable sino posible. No obstante, incluso si tal cosa se lograra, los problemas de diálogo parecen de momento insuperables; consideremos, por ejemplo, las severas limitaciones que impondría el tiempo que tardarían nuestros respectivos mensajes en salvar las inmensas distancias del espacio.

Al pensar en el universo y en el lugar que en él ocupamos, debemos también considerar la evolución global del mismo. ¿Es acaso nuestra visión demasiado prosaica y vulgar? ¿Qué nuevas leyes físicas debemos aprender para desentrañar los misterios de la creación, la existencia y el futuro del universo? ¿No nos revelarán éstos que nuestra visión del *Big Bang* y del universo en expansión es, de hecho, completamente errónea?

Los datos obtenidos hasta el momento sugieren que esta visión es, en general, correcta. Empero, el papel fundamental que la humanidad parece desempeñar en este panorama da lugar a cuestiones más interesantes, especialmente la de hasta qué punto la habilidad del ser humano para observar y comprender el universo produce algún efecto en la realidad de éste.

A medida que avanzan, la física y la astronomía nos revelan cada vez más acerca del futuro lejano de nuestro universo. Éste puede no ser tan simple o comprensible como se pensó en otros tiempos. Por poner un ejemplo, los agujeros negros y el espacio que encierran presentan extrañas posibilidades y provocan dudas acerca de si la perspectiva científica actual no se basa aún en conceptos demasiado limitados como para permitir una comprensión completa del universo.

***El módulo lunar* Eagle** *asciende desde la superficie de la Luna tras completar la misión* Apolo II *en julio de 1969. Por primera vez, el ser humano había hallado un mundo extraño al suyo. En opinión de algunos científicos, la aparición de formas de vida inteligente y su colonización del universo era algo «planeado» desde el principio por las leyes del cosmos.*



EL HOGAR PLANETARIO

• *Nuestro mundo viviente*

En la Tierra, nuestra nave espacial planetaria, los seres humanos vivimos y evolucionamos junto con un vasto complejo de vida animal y vegetal, desde bacterias microscópicas hasta enormes elefantes y desde virus diminutos hasta gigantescas secoyas. Si bien, al igual que el resto de los planetas telúricos, la Tierra posee un denso núcleo rodeado por un manto y recubierto por una corteza exterior, cuenta con esta diferencia esencial: la existencia de vida.

Durante el siglo XX se ha puesto de manifiesto que si existe vida sobre la Tierra se debe a que en ella se dan las condiciones adecuadas. No es ni demasiado caliente ni demasiado fría, y su atmósfera se encarga de neutralizar aquellas radiaciones letales. Adicionalmente, sus entornos químico y bioquímico se encuentran en perfecto equilibrio, lo que asegura no sólo la existencia de los seres vivos, sino también su proliferación. Este benigno equilibrio ha evolucionado junto con la vida a lo largo de largos períodos de tiempo. Si lo descompensamos o destruimos corremos el peligro de ver esa rica variedad de formas disminuida e incluso amenazada de extinción.

La temperatura de la Tierra se mantiene dentro de unos límites que permiten la existencia en estado líquido del agua, un ingrediente fundamental para la vida. La temperatura media sobre la superficie de la Tierra es de 15 °C, lo que equivale a unos 33 °C más que si dependiera tan sólo de la radiación solar. El motivo de ello es que parte del calor irradiado por el planeta se ve atrapado por la «manta» de dióxido de carbono y vapor de agua atmosféricos, lo que proporciona calor a los mares y continentes que cubren el planeta.

Pero si este calentamiento continuara sin freno, el efecto invernadero produciría unos efectos similares a los de Venus (págs. 110-113). En consecuencia, la temperatura aumentaría demasiado como para permitir la existencia continuada de vida. Se trata de un efecto en cadena que puede haber sido evitado gracias a la modificación del entorno terrestre por sus habitantes vivos. Tal es la base de la hipótesis Gaia.

Dicha hipótesis fue propuesta a finales de los años sesenta por el científico atmosférico británico James Lovelock, quien, junto con la bióloga norteamericana Lynn Margulis, había comenzado a estudiar el sistema natural terrestre de compensaciones y equilibrios. Contemplando la Tierra como un organismo vivo —de modo similar a como hicieran los chinos en el pasado—, Lovelock y Margulis observaron que la Tierra goza siempre de estabilidad climática independientemente de los constantes cambios climáticos. El dióxido de carbono y el vapor de agua ayudan a caldear su superficie, pero el calentamiento no se dispara gracias a que ambos gases resultan reciclados de varias maneras.

A través del proceso fotosíntesis, por ejemplo, la luz del sol permite a las plantas servirse del dióxido de carbono y del agua para fabricar carbohidratos, sustancias tales como azúcares, almidón y celulosa. A cambio se produce una liberación de oxígeno como producto de desecho, oxígeno que utilizan los animales para respirar.

Cuando las plantas mueren y se descomponen, el carbono de sus tejidos se combina con el oxígeno atmosférico; ello libera dióxido de carbono, lo que estimula el efecto invernadero. No obstante, parte del carbono desaparece y pasa a formar parte de las conchas de las criaturas marinas en forma de carbonato cálcico insoluble, tras lo cual llega a alcanzar los sedimentos del lecho marino. Según la hipótesis de Gaia, ello

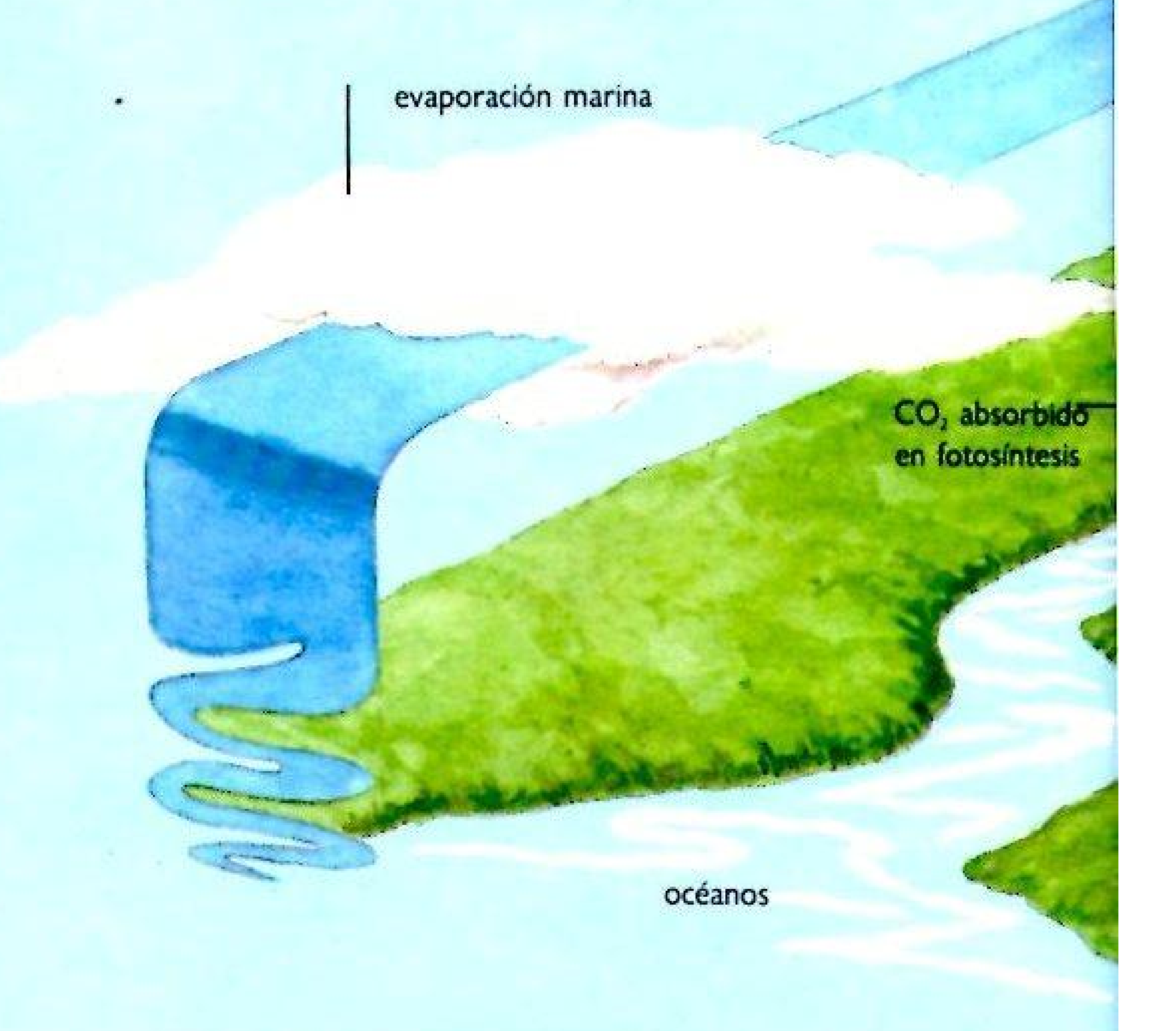
***La Tierra debe su calor** al dióxido de carbono que contiene su atmósfera, el cual atrapa una parte de energía solar que, de otro modo, sería irradiada de nuevo al espacio. Existe un equilibrio permanente entre la corteza y la atmósfera: la actividad volcánica libera dióxido de carbono, mientras que los procesos meteorológicos y biológicos lo extraen del aire.*

***Marte no posee actividad volcánica,** por lo que el carbono se mantiene fijo en las rocas. Su atmósfera de dióxido de carbono es demasiado ligera para retener el calor.*

***Venus está demasiado cerca del Sol** para que haya agua en estado líquido, lo que impide el desarrollo de procesos meteorológicos que reduzcan el dióxido de carbono.*



La fotosíntesis de las plantas verdes *produce el oxígeno que distingue a nuestra atmósfera de las del resto del sistema solar.*



El carbono y el agua se reciclan *por medio de procesos naturales. El agua se evapora de los océanos y la tierra a la vez que se libera a través de la transpiración de las plantas. Luego, regresa en forma de lluvia, nieve o aguanieve y se enfría. Por fin, es devuelta al mar, donde el proceso se inicia de nuevo.*

El dióxido de carbono gaseoso y el disuelto son absorbidos de la atmósfera y el agua por las plantas terrestres y acuáticas respectivamente durante la fotosíntesis. Al morir, las plantas se descomponen y devuelven el dióxido de carbono a la atmósfera. Los animales consumen el carbono de las plantas y lo liberan con sus desechos y al descomponerse sus cuerpos. Al morir, los organismos marinos forman sedimentos ricos en carbono.

evita la formación de un exceso de carbono. También los seres vivos terminan por intervenir en el control de los demás ciclos y del efecto invernadero. Las diminutas plantas marinas o fitoplancton, por ejemplo, ayudan a reciclar el azufre y el yodo, exudando partículas que contienen dichos elementos y formando los núcleos en torno a los cuales se condensa el agua atmosférica para formar las nubes.

Las nubes se forman por el enfriamiento y condensación del vapor de agua ascendente. Cuanto más elevada es la temperatura de la Tierra mayor es la producción de vapor de agua a partir de los océanos que cubren las tres cuartas partes de su superficie. Debido a su color blanco, las nubes reflejan la luz del sol y ayudan a refrescar la atmósfera. Cumplen la misión de portar la lluvia y devolver el agua al nivel del suelo.

Sin duda existen factores biológicos que desempeñan un papel importante en el control del medio ambiente terrestre. Sin embargo, la presencia de los seres humanos sobre el planeta introduce otros factores distintos, a pesar de que formamos parte del sistema biológico del planeta. Hoy día, existe una preocupación generalizada por dos cuestiones: la presencia de «agujeros» en la capa de ozono y el calentamiento global de la Tierra.

El ozono, una molécula compuesta por tres átomos de oxígeno, se forma al descomponer la luz solar ultravioleta el oxígeno atmosférico. La mayor parte del ozono atmosférico flota a una altura que oscila entre 13 y 24 km sobre la superficie terrestre. Considerado como un elemento crucial para la vida, absorbe la peligrosa radiación ultravioleta de onda corta, que causaría formas mortales de cáncer en los seres humanos y otros animales si pudiera penetrar libremente. Dicha radiación amenazaría asimismo la existencia del fitoplancton y haría disminuir el rendimiento de las cosechas. El enfriamiento de la atmósfera superior por la falta de ozono podría causar cambios climáticos.

Según parece, la destrucción del ozono se halla causada principalmente por la utilización comercial de los clorofluorocarbonos (CFCs) empleados para la fabricación de aerosoles y refrigerantes. En las regiones de aire frío los CFCs reaccionan con el óxido nitroso de la atmósfera para formar compuestos de cloro. Cada molécula de cloro puede destruir 100.000 moléculas de ozono.

Asimismo, se piensa que el uso de los CFCs contribuye al calentamiento global del planeta y, con ello, a provocar un incremento a largo plazo de la temperatura del mismo. A juzgar por los datos existentes, el calentamiento global se está acelerando, debido fundamentalmente al uso extendido de combustibles fósiles tales como el petróleo y el carbón, cuya combustión libera dióxido de carbono que, al incorporarse a la atmósfera, contribuye a interrumpir la eliminación de calor.

Se calcula que la temperatura media del planeta se incrementará entre 1,5 y 4,5 °C a mediados del siglo XXI si no se reducen las emisiones de dióxido de carbono. Ello produciría un importante derretimiento del hielo de los continentes, así como una elevación aproximada de un metro en el nivel del mar, debido a la dilatación de las aguas superficiales cálidas. Como resultado, podrían verse inundadas parcialmente Nueva York, Londres y Tokio, mientras que atolones tales como el de las Maldivas se verían sumergidos por completo.

Los cambios climáticos que acompañarían a este calentamiento producirían diversos efectos. Al incrementarse la humedad, algunas partes de Canadá y de Escandinavia podrían convertirse en zonas agrícolas, y aumentaría la producción en Australia central y ciertas zonas de África, China, India y Sudamérica. Por otra parte, las zonas cerealeras de Estados Unidos y la antigua Unión Soviética sufrirían importantes sequías.

Aún está por ver hasta qué punto las fuerzas de Gaia sabrán «rescatar» al planeta de un posible cambio climático violento. Lo que es seguro es que el equilibrio químico y biológico resulta crucial para el mantenimiento de la vida sobre la Tierra. Si el equilibrio químico fuera completo —si las moléculas no se reciclaran—, la Tierra perdería toda forma de vida.

Las condiciones que observamos sobre la Tierra influyen de modo importante a la hora de considerar las posibilidades de que exista vida en otro lugar del universo.

lluvia y nieve

glaciares

evaporación de lagos, ríos y continentes

ríos

CO_2 atmosférico

CO_2 procedente de la respiración

lagos

CO_2 disuelto

rocas carbonatadas

sedimentos carbonatados

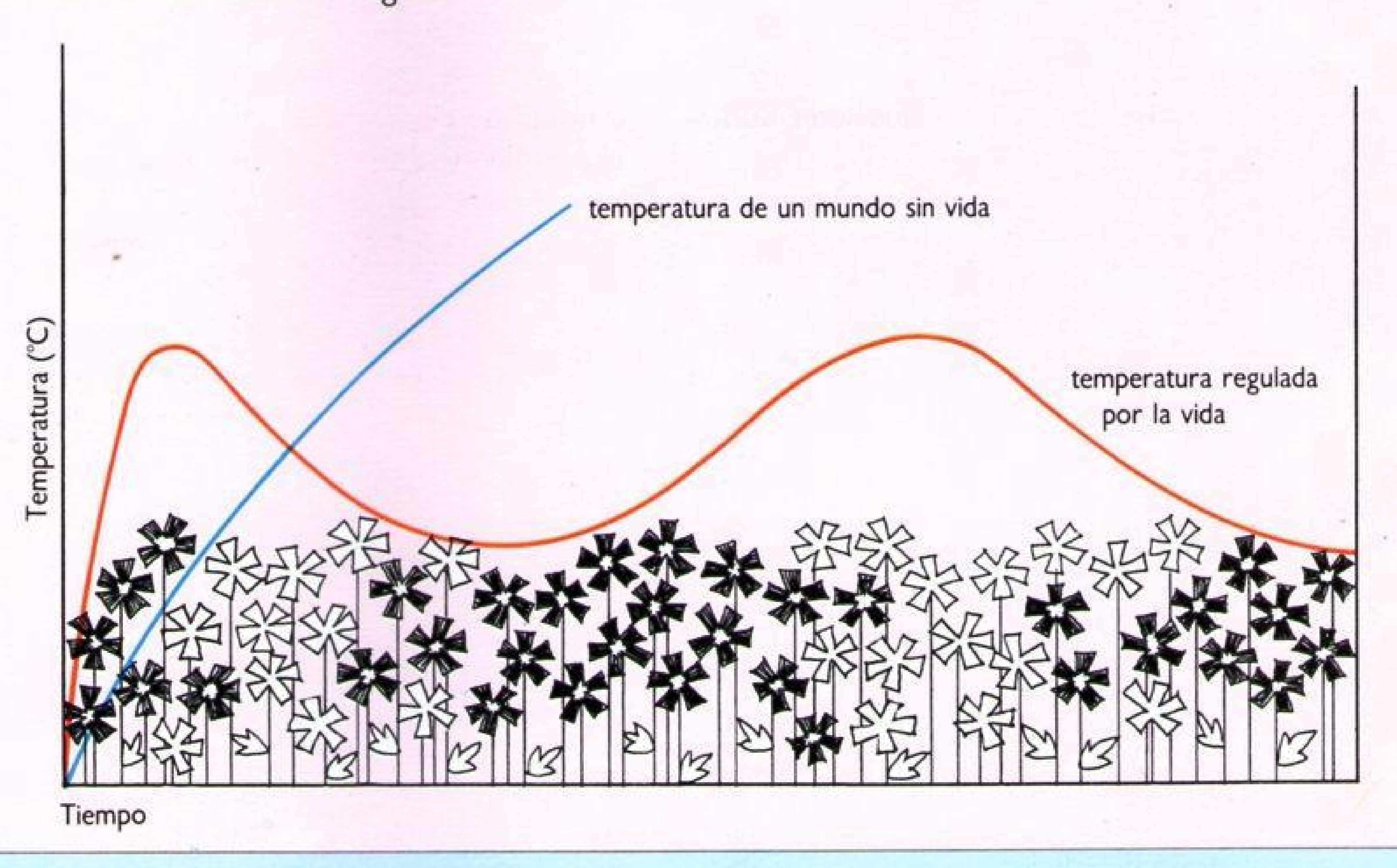
CO_2 liberado por la actividad geológica

biomasa en descomposición

El planeta de las margaritas

Las críticas a la teoría de Gaia se basan fundamentalmente en el hecho de que los organismos que intervienen en el proceso descrito deberían «saber» de antemano qué es preciso para mantener el equilibrio del planeta. A esto respondió Lovelock diseñando un programa de ordenador en el que describía un hipotético «mundo de margaritas» terrestre. Las margaritas podían ser blancas o negras. Iniciaban su crecimiento con 5 °C de temperatura, florecían a los 20 °C y su desarrollo se detenía al alcanzar los 40 °C.

A los 5 °C fructificaban las margaritas negras debido a que absorbían más luz solar y se calentaban más que el suelo. Así, la temperatura ambiente se incrementaba lentamente, causando la destrucción de las margaritas negras y permitiendo al mismo tiempo el florecimiento de las blancas, capaces de enfriarse gracias al color blanco de sus pétalos. Con ello, la temperatura ambiente descendía y se producía un nuevo florecimiento de las flores negras.



LA NATURALEZA DE LA VIDA

• *Características de los organismos vivientes*

Hace más de 2.500 años, el filósofo griego Aristóteles, quien era asimismo un notable biólogo, afirmó lo siguiente: «Al hablar de "poseer vida", nos referimos a algo capaz de alimentarse, crecer y envejecer.» En efecto, Aristóteles mencionaba tres características inherentes a todo ser viviente, pero de ningún modo las únicas.

Los cristales, por ejemplo, son formas de materia no viviente que muestran el comportamiento descrito por el filósofo. Si suspendemos un trozo de cordel en una solución concentrada de azúcar o de sal, observaremos que se cubre de cristales. El cordón es «alimentado» por el azúcar y, con el tiempo, los cristales se multiplican y crecen hasta que todo el azúcar se ha cristalizado.

Esta forma de crecimiento y multiplicación es, efectivamente, una característica de la materia viva, si bien no es propiedad exclusiva de ella. El azúcar puede ser devuelto a la solución, causando la descomposición o «muerte» de los cristales, pero ello no los convierte en seres vivos.

Dado que el alimento, el crecimiento y el envejecimiento no bastan para definir la vida, debemos buscar otros atributos. Los organismos vivos se definen por su habilidad para reproducirse y repararse. Adicionalmente, deben ser capaces de reaccionar frente a los cambios de su entorno.

El matemático norteamericano de origen húngaro John von Neumann —pionero del desarrollo de los modernos computadores— ideó una representación matemática de un modelo de máquina autoduplicante. Tal máquina constaría de dos partes: una *constructora* y un programa de ordenador que contuviera datos e instrucciones. Los actos de la constructora dependerían tanto de las instrucciones del ordenador como del entorno.

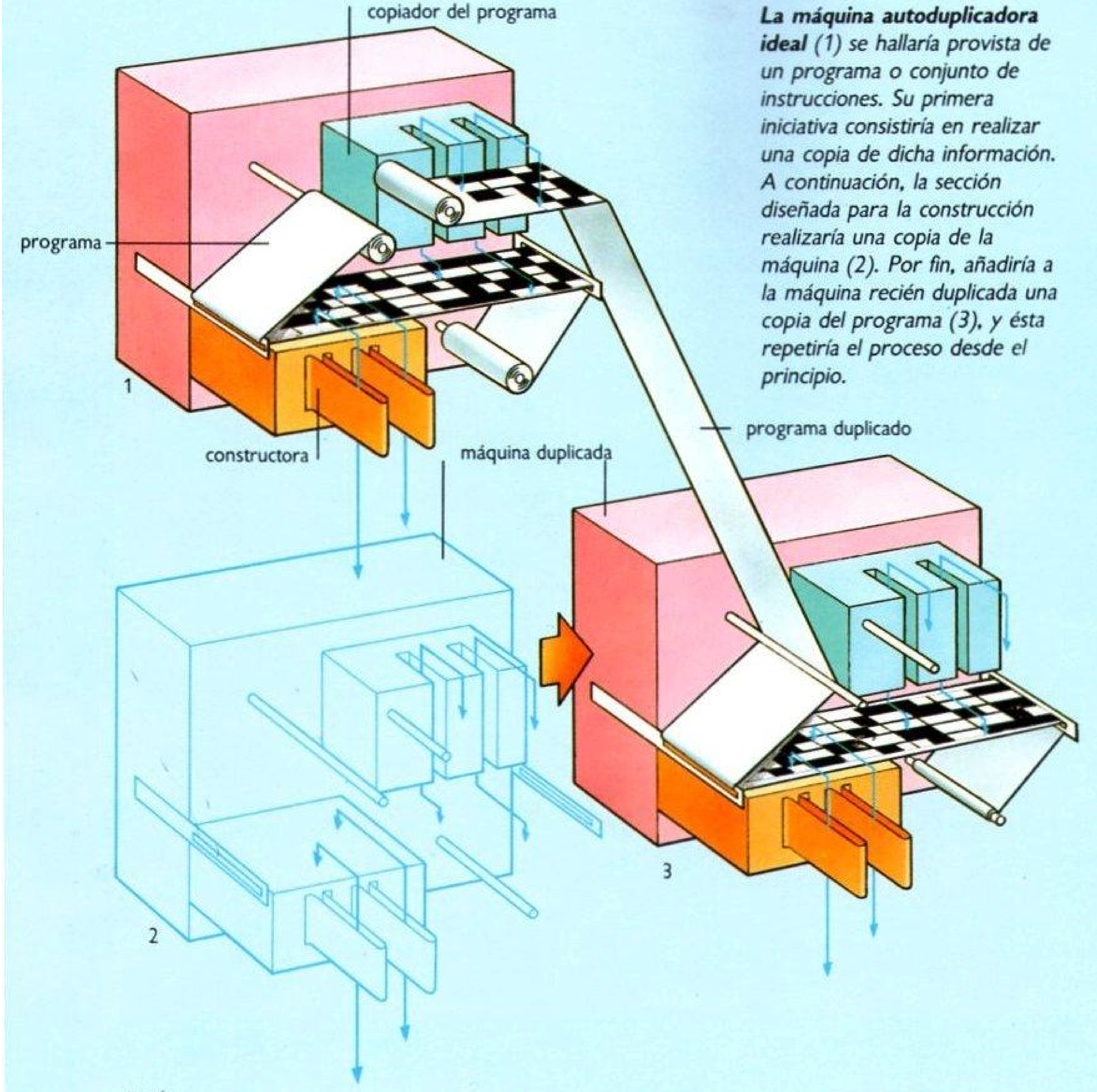
Para funcionar, la máquina autoduplicante debería ser capaz de recuperar y utilizar los materiales a su alcance. En condiciones favorables, la máquina «hija» que produjera poseería su propia base de datos y sería también autoduplicante. Asimismo, debido a que utilizaría materias primas disponibles en su entorno, podría decirse que la máquina interactuaba —aún de modo limitado— con el mismo. En principio, la máquina no habría sido capaz de autorrepararse, pero tampoco cabe descartar esta posibilidad por completo.

Al comparar semejante máquina con un organismo vivo, descubrimos la existencia de diferencias cruciales. En primer lugar, toda materia viva se compone de células que constituyen complejas amalgamas de materiales bioquímicos simples. Estas células pueden crecer y dividirse y, al hacerlo, se autoduplican.

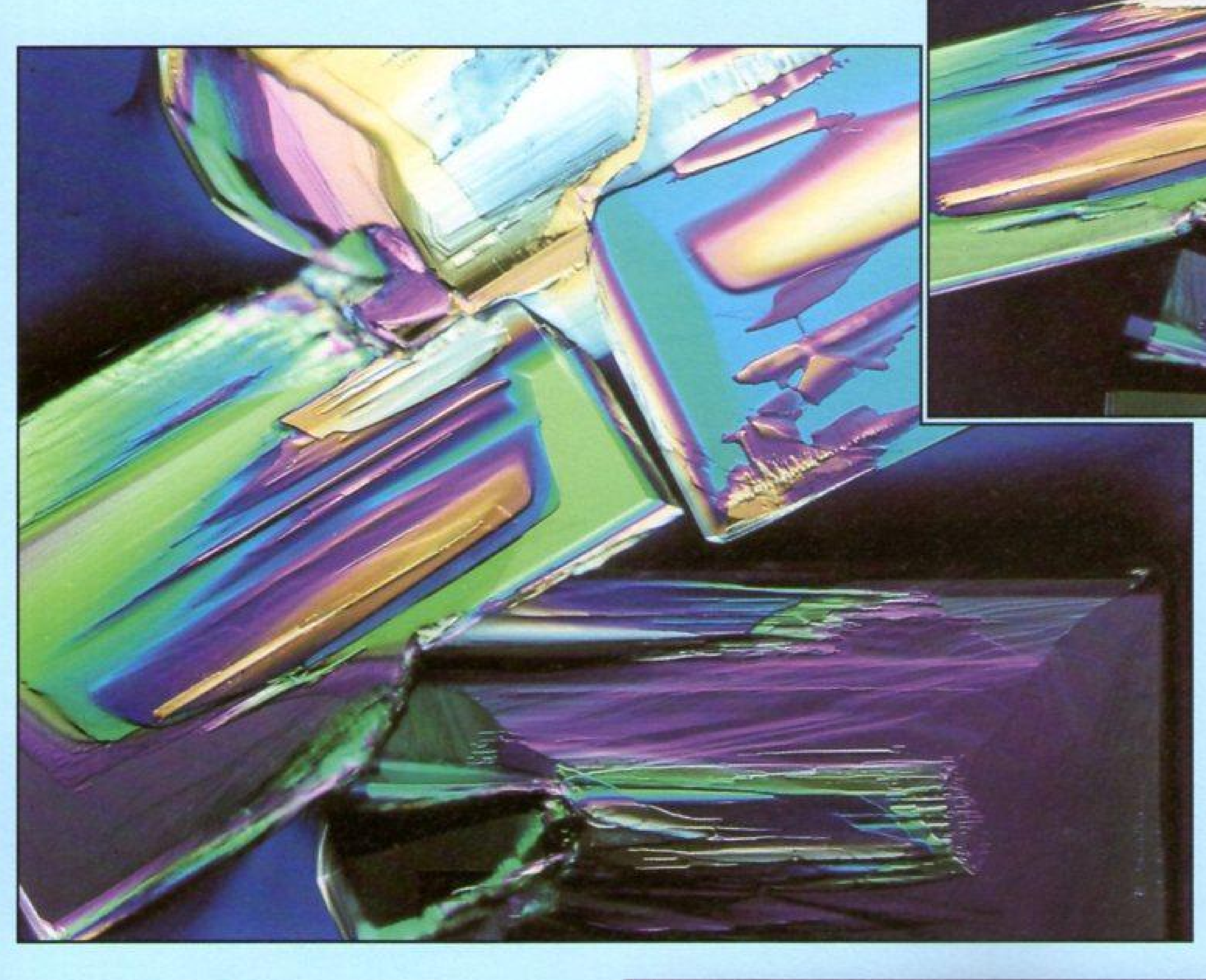
La diferencia esencial entre los procesos que desarrollan los organismos vivos y los no vivos reside en el modo en que unos y otros emplean la materia disponible. El crecimiento, duplicación y autorreparación de la materia viva tiene lugar *en el interior* del cuerpo de un organismo. A diferencia de los cristales o de la hipotética máquina de von Neumann, que obtendrían materiales del exterior y los utilizarían tal y como son, una única célula es capaz de servirse de los ingredientes más simples para transformarse en un complicado organismo formado por millones de ellas. Por el contrario, una vez se hallara dentro del cristal o de la máquina, la materia sería inmutable. Dichos objetos inanimados no pueden asimilar sustancias simples, adaptarlas y utilizarlas para autoduplicarse y multiplicarse del mismo modo que hacen las células.

La capacidad de autorreparación de los seres vivos es notable. Una estrella de mar que pierde un brazo desarrollará otro. Muchas heridas profundas cicatrizan sin ayuda. El hígado humano puede regenerarse incluso si se ve reducido a una cuarta parte de su volumen normal.

Igualmente variado es el modo en el que los seres vivientes reaccionan frente a su entorno. Por tomar uno de los organismos más simples, las bacterias responden a los



La máquina autoduplicadora ideal *(1) se hallaría provista de un programa o conjunto de instrucciones. Su primera iniciativa consistiría en realizar una copia de dicha información. A continuación, la sección diseñada para la construcción realizaría una copia de la máquina (2). Por fin, añadiría a la máquina recién duplicada una copia del programa (3), y ésta repetiría el proceso desde el principio.*



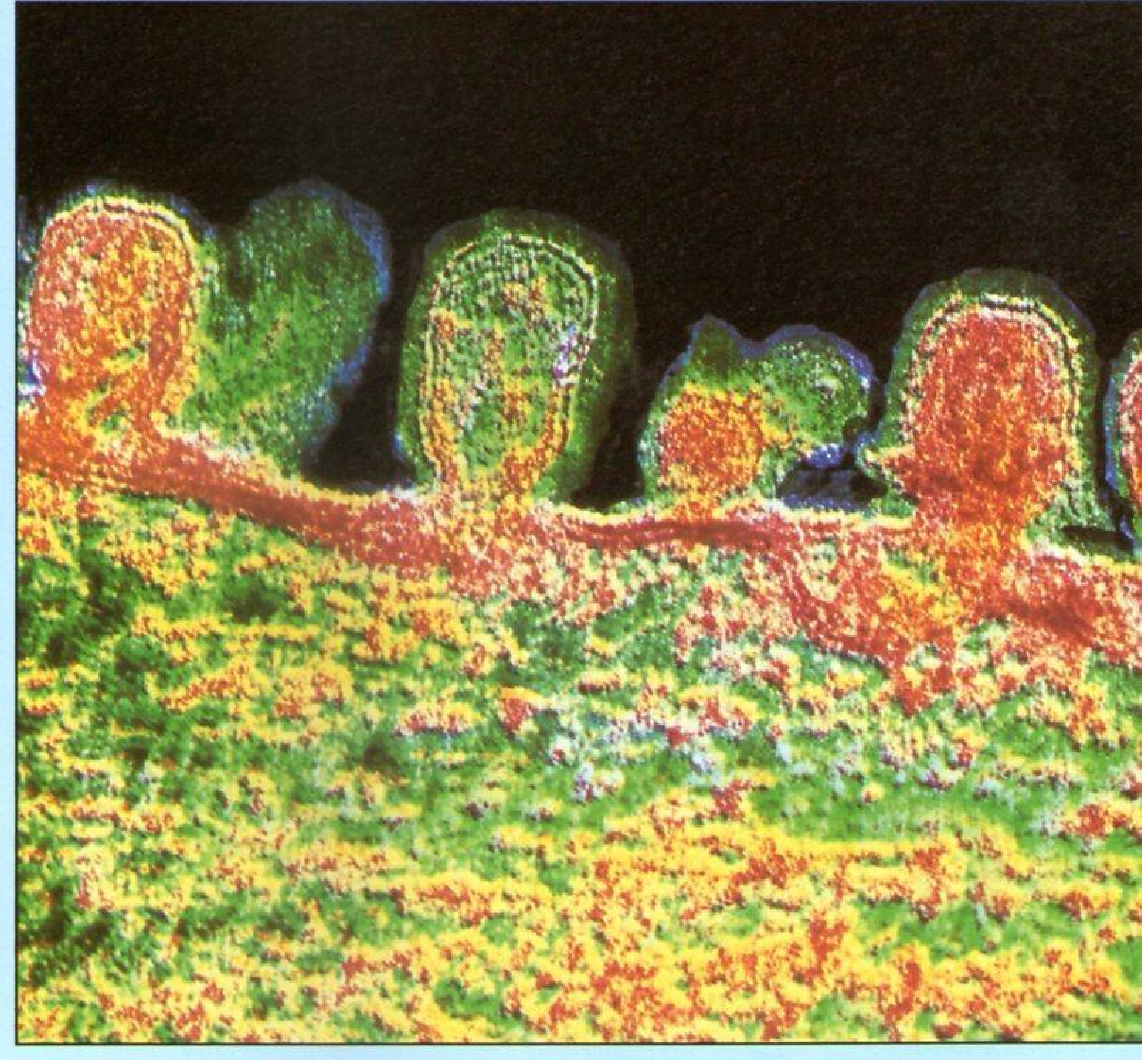
Los virus son lo bastante astutos como para explotar la capacidad *de las células huéspedes para reproducirse (abajo). En la imagen vemos cómo nuevos cuerpos víricos surgen de tales células. El virus no puede fabricar copias de sí mismo, pero sí «secuestrar» a una célula para que realice la tarea por él.*

Los cristales parecen crecer *y reproducirse (arriba y a la izquierda) en ciertos entornos: por lo general, cuando se hallan sumergidos en líquidos donde está disuelta la sustancia que los forma. Pero no son capaces de adaptarse a los cambios de dicho entorno ni de autorrepararse.*

cambios producidos en su medio —especialmente en lo que se refiere a sus fuentes de alimentación— mediante sutiles alteraciones de sus procesos químicos internos.

Las diferencias resultan aún más evidentes al considerar el comportamiento de plantas y animales altamente desarrollados. La atrapamoscas Venus, por ejemplo, es una planta carnívora que se alimenta de aquellos insectos que se posan sobre ella. Sus «órganos de los sentidos» experimentan reacciones químicas que le permiten detectar la presencia de alimento. En los animales, los sentidos del oído, la vista, el tacto, el olfato y el gusto dan lugar a complejas reacciones frente al entorno, entre las que se incluyen localizar los alimentos y la pareja reproductora adecuada.

Aun cuestionablemente, cabe decir que el ser humano constituye la cima del desarrollo. Nuestras complejas reacciones frente al entorno, nuestra capacidad de memoria, nuestro pensamiento constructivo y nuestra consciencia nos elevan muy por encima de cualquier otra especie. Es posible que algún día podamos crear robots capaces de imitar algunas de estas funciones pero, en cualquier caso, éstos siempre poseerán un origen biológico, dado que habrán sido diseñados por seres humanos.



LA QUÍMICA DE LA VIDA

• *Los elementos básicos para su construcción*

Desde microorganismos tales como las bacterias hasta las mayores plantas y animales, todos los seres vivos existentes sobre la Tierra se basan en el mismo elemento químico: el carbono. Ello parece deberse a que el átomo de carbono es único en la manera que tiene de unirse con otros átomos de carbono y con átomos de otros elementos, especialmente los de hidrógeno.

Los átomos de carbono pueden unirse compartiendo sus electrones. Así, un átomo de carbono puede unirse con otro idéntico y al mismo tiempo establecer un vínculo con otros elementos o compuestos. El resultado es que el carbono puede formar moléculas dotadas de una estructura de «anillo» basada en la unión de seis átomos. Estas resultan esenciales para numerosos procesos vitales, entre los que se incluye la fotosíntesis. Asimismo, muchas de estas moléculas son solubles en agua.

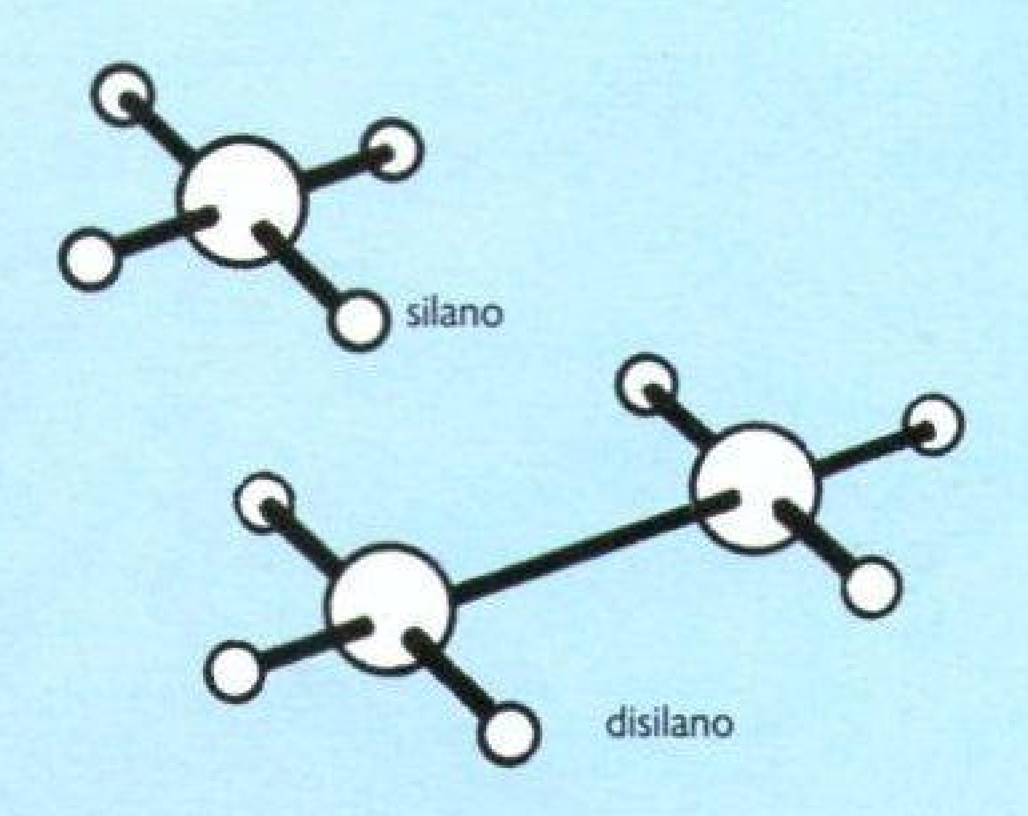
Los átomos de carbono no sólo pueden formar anillos, sino también combinarse entre sí para formar largas cadenas o polímeros. En la naturaleza, estos polímeros conforman la espina dorsal química de complejas moléculas orgánicas que resultan vitales para la estructura y mantenimiento de la vida, desde las paredes estructurales de las células vegetales hasta la insulina.

La versatilidad del carbono es tal que la escala de temperatura de las formas de vida en él basadas resulta enorme según los estándares terrestres y celestiales. Cubre aproximadamente 100 °C, esto es, la distancia que separa los puntos de congelación y ebullición del agua, sustancia presente en mayor proporción en la mayoría de los organismos vivos. En la zona superior de esta escala hallamos algas que se desarrollan a temperaturas de 70° C y 80 °C y algunas formas bacterianas capaces de reproducirse activamente a 95 °C. De hecho, estas últimas llegan a sobrevivir a temperaturas de hasta 104 °C en condiciones de laboratorio.

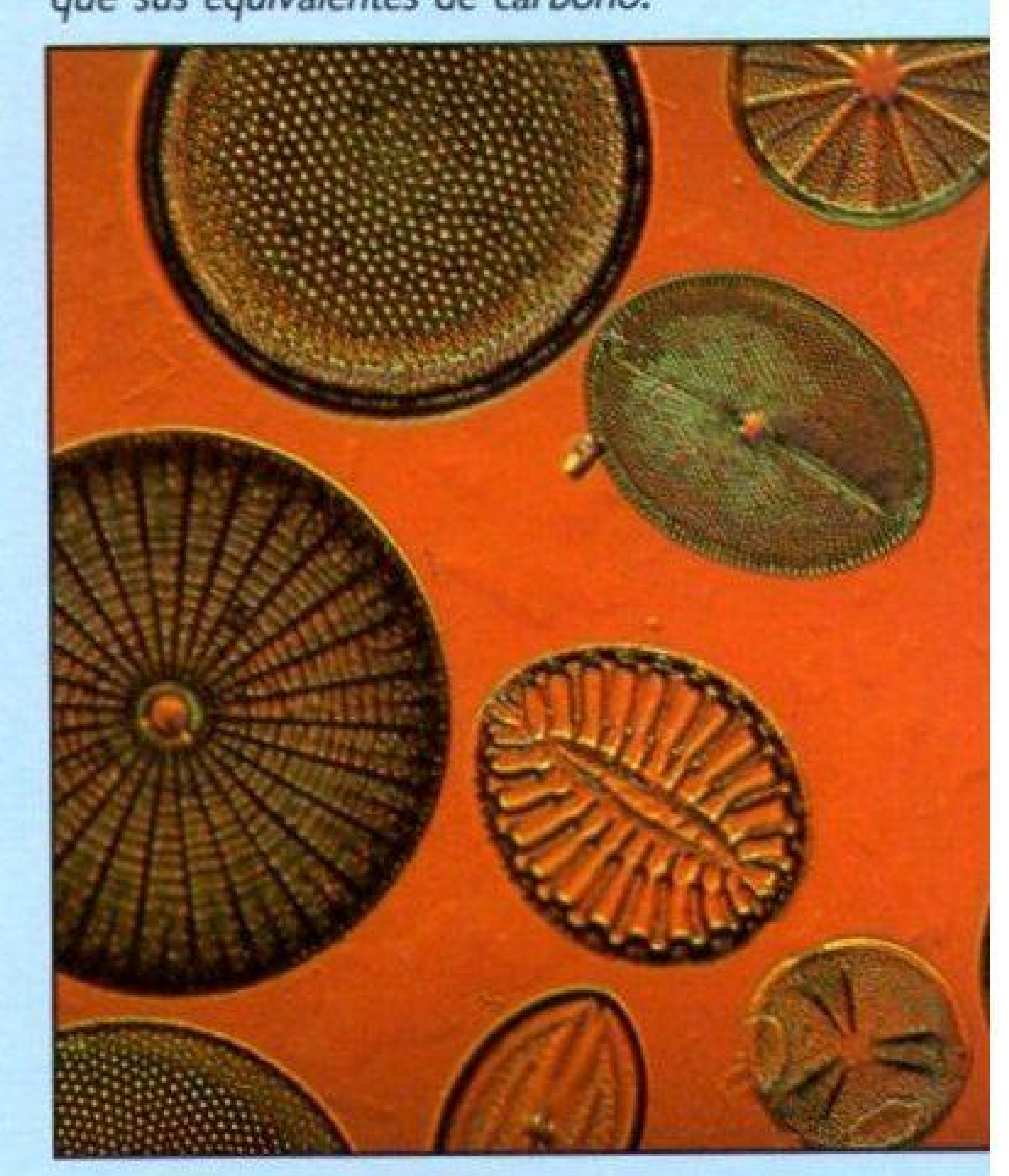
Existen numerosos líquenes capaces de sobrevivir tanto bajo el calor del Sáhara como sometidos a los hielos del Ártico. Ciertos peces cuentan con una variedad de sangre que permite su supervivencia incluso algunos grados por debajo del punto de congelación del agua. De hecho, es posible que existieran fuera de la Tierra formas de vida adaptadas a bajas temperaturas. Sin embargo, la escasa energía producida por tales sistemas haría que la evolución de cualquier forma vital compleja fuera tan lenta que siempre habría de hallarse sometida a las imposiciones del entorno, por lo que no sobreviviría mucho tiempo.

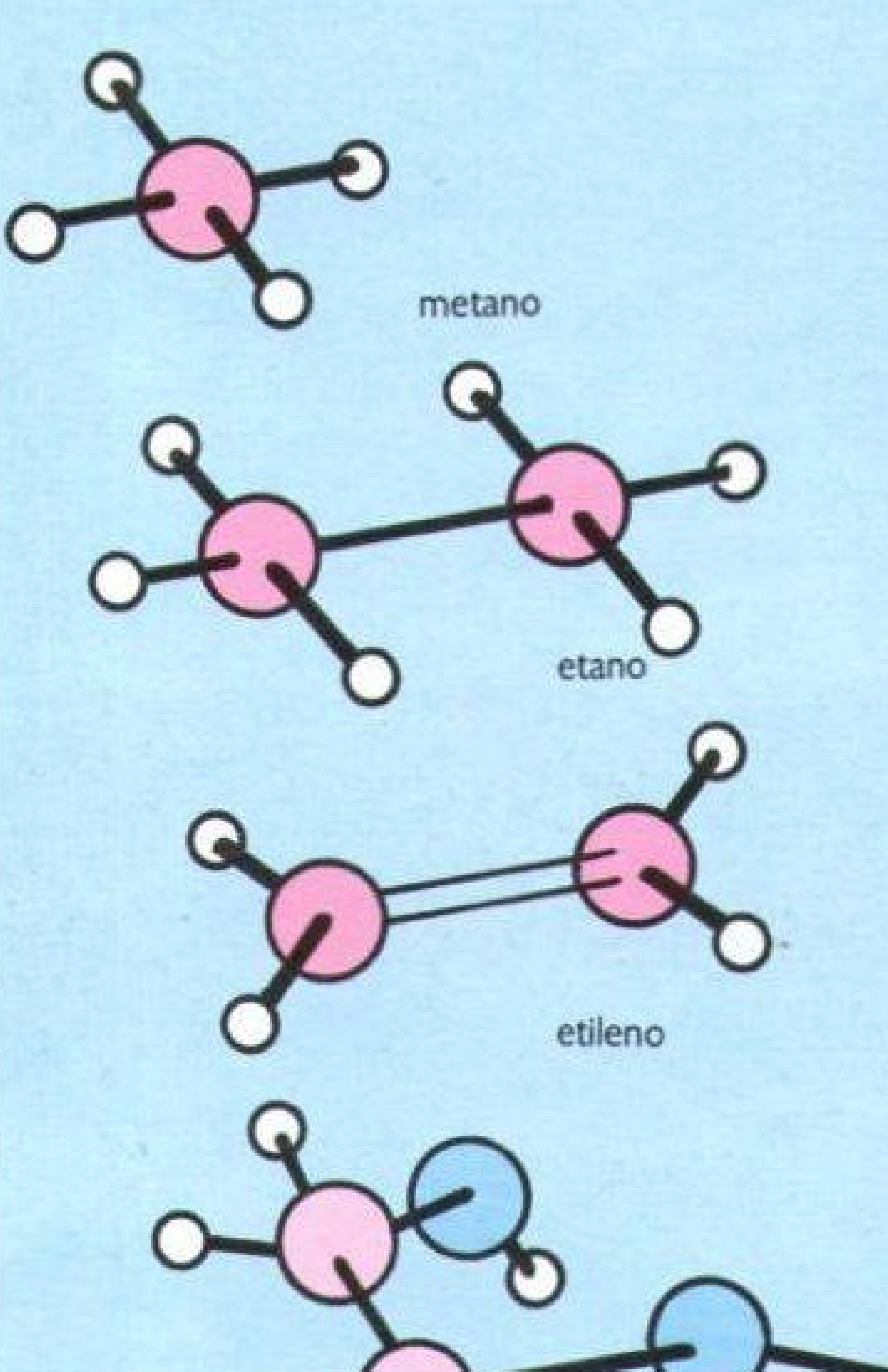
Las radiaciones de onda corta limitan asimismo las posibilidades de vida, pues descomponen o modifican las complejas moléculas de materia viva, tal y como sucede, por ejemplo, cada vez que nuestra propia piel se tuesta por el efecto de los rayos ultravioletas. Así, la vida sólo puede existir en lugares protegidos de esta radiación por alguna forma de atmósfera.

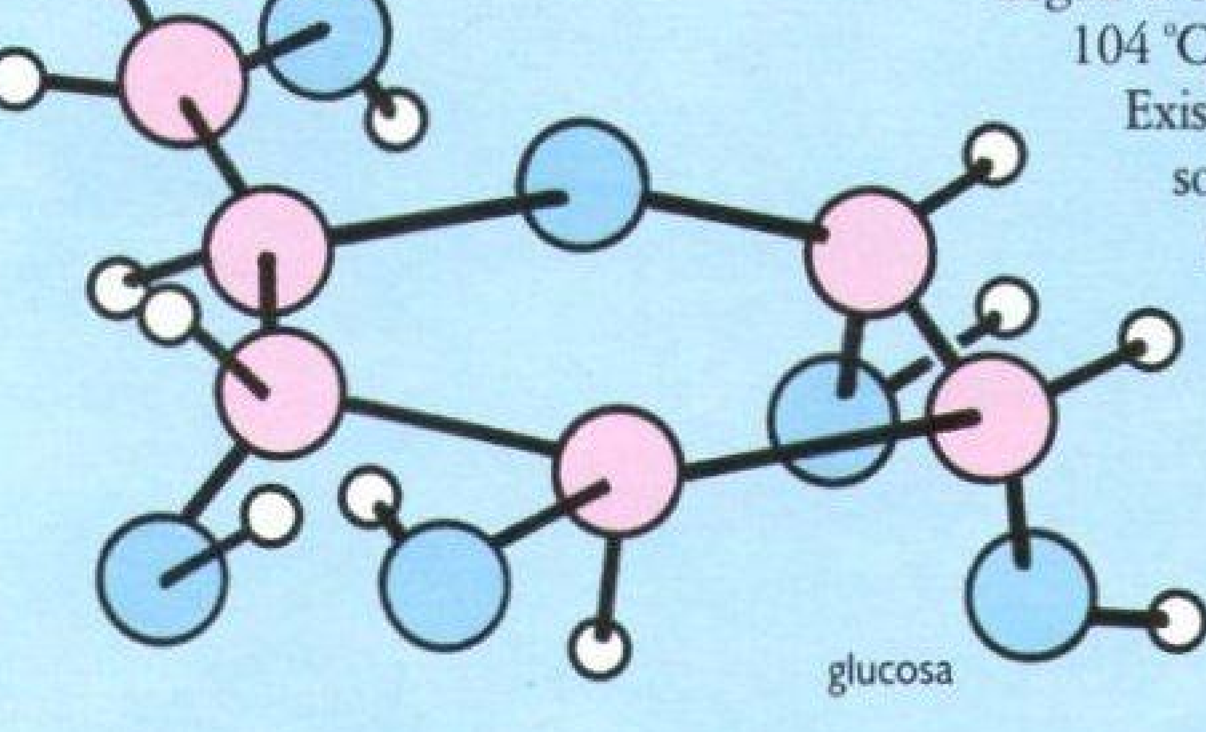
En la Tierra, el oxígeno no sólo forma

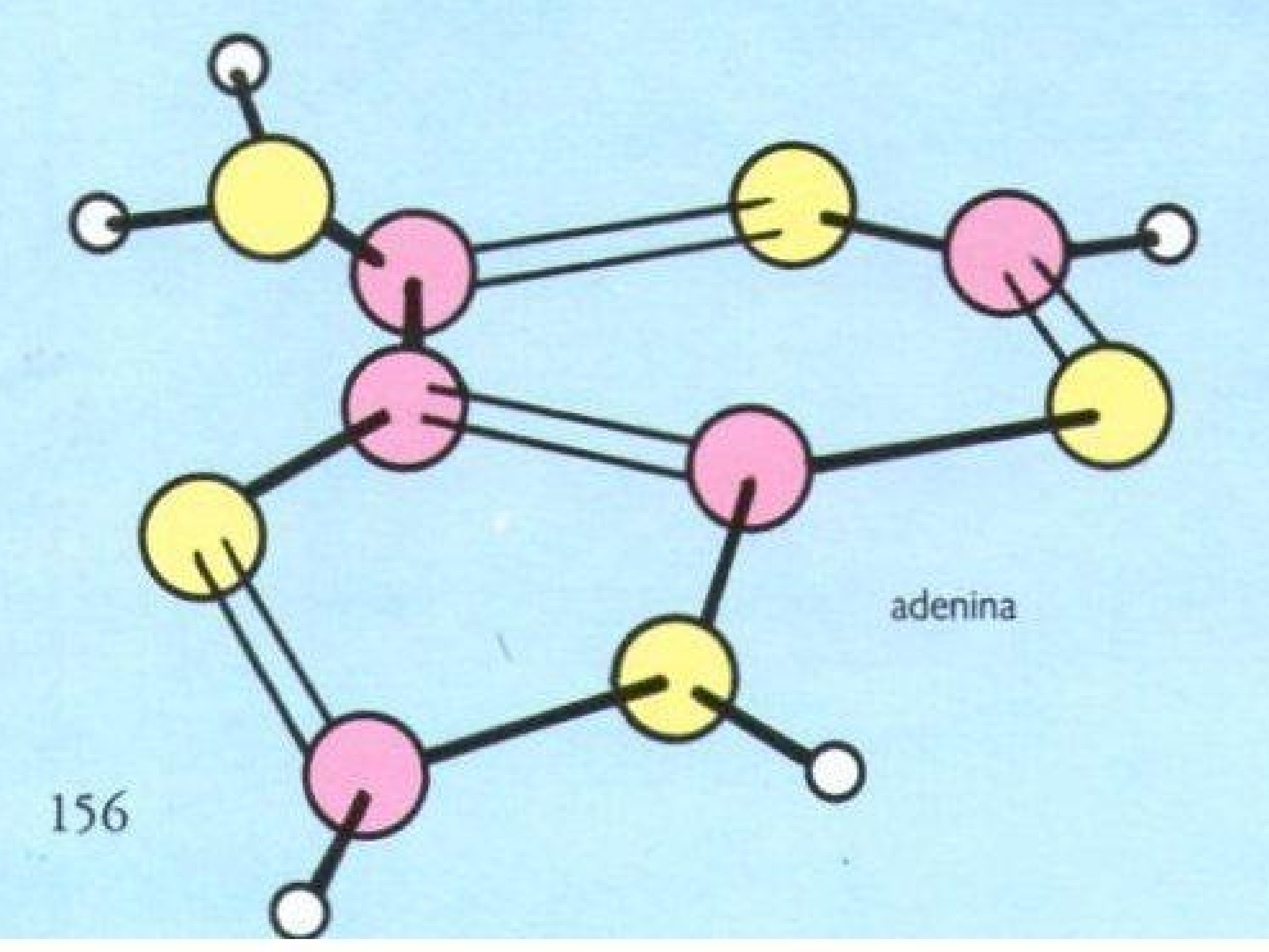


El silicio es similar al carbono *por su capacidad de formar largas cadenas de moléculas. Las moléculas de silano y disilano, por ejemplo, son análogas a las de metano y etano. No obstante, estos compuestos de silicio son menos estables que sus equivalentes de carbono.*









El carbono es único *en cuanto a la variedad de moléculas que puede formar. Estas resultan tipificadas por el metano, el etano, el etileno, la glucosa y la adenina. En la ilustración, los átomos de carbono aparecen representados de color rosa, blancos los de hidrógeno, azules los de oxígeno y amarillos los de nitrógeno.*



Las diminutas diatomeas (izquierda), base de la cadena alimentaria de los océanos, utilizan el silicio para endurecer sus conchas.

En los oscuros lechos de las fosas oceánicas habitan estas criaturas en forma de tubo, de dos metros de longitud. Se alimentan de bacterias que extraen energía del agua caliente, rica en sulfuro de hidrógeno, que mana de las fuentes termales. Son las únicas comunidades vivientes que extraen su energía de una cadena no basada en la fotosíntesis.

parte de la atmósfera, sino que constituye uno de los elementos más importantes para el sostenimiento de la vida. El oxígeno atmosférico es desprendido por las plantas verdes como producto de desecho, tras lo cual es absorbido por el proceso respiratorio de los animales. Sin oxígeno, la variedad de seres vivos sería mucho más restringida, pero cabe especular acerca de si en otro lugar del universo no habría podido otro elemento tomar su lugar. Se ha descubierto, por ejemplo, que el azufre actúa en ocasiones de modo similar al oxígeno, suministrando la energía necesaria para la supervivencia de extrañas criaturas abisales.

Los bioquímicos han considerado la posibilidad de que existan sistemas vivientes basados no tanto en el carbono como en el silicio. Aunque este último no puede formar moléculas alargadas ni en forma de anillo, sí logra combinarse con el oxígeno. La arena —o sílice— es uno de los elementos químicos más corrientes de nuestro planeta, y existen numerosas rocas terrestres en las que pueden hallarse compuestos de sílice mezclada con calcio y aluminio.

Empero, estos compuestos no son solubles en agua, lo que los elimina como posible soporte de vida. Ello no significa que tal escenario sea imposible. Algunas bacterias terrestres son capaces de producir y procesar sustancias insolubles tales como el azufre.

En general, las moléculas de sílice son más resistentes al calor que las del carbono. Las siliconas —polímeros que, dotados de una cadena central de oxígeno alternado y de átomos de sílice, son utilizados frecuentemente para la fabricación de lubricantes y goma sintética— se mantienen estables hasta temperaturas de 350 °C. Los bioquímicos afirman que si fuera posible la existencia de vida basada en la sílice, ésta resultaría estable hasta temperaturas de hasta 250 °C. Así, resulta concebible que si los átomos situados en el campo silícico mostraran una mayor variedad pudieran suministrar la base para la creación de vida en cualquier otro lugar del universo, allí donde las condiciones imperantes alcanzaran temperaturas muy superiores a las de la Tierra.

EL COMIENZO DE LA VIDA

• *La construcción de las moléculas esenciales*

Si bien continúa siendo un misterio el modo en que surgió la vida sobre la Tierra, resulta probable que fuera de una de dos maneras posibles. O bien comenzó una vez que se dieron las condiciones apropiadas para la síntesis de sus elementos químicos básicos, o bien surgió gracias a la llegada de formas complejas de materia orgánica procedentes del espacio.

En la década de los treinta, el científico ruso Aleksandr Oparin y los norteamericanos Melvin Calvin y Harold Urey llegaron a la conclusión de que la vida podría haber surgido en una atmósfera desprovista de oxígeno en estado libre (tal y como sucedió en la Tierra durante el período en el que éste se hallaba combinado con otros elementos químicos). Su teoría fue respaldada por Stanley Miller, quien realizó un experimento con el que se intentaban recrear las condiciones existentes en la Tierra hace entre 3.500 y 4.000 millones de años.

Miller hizo pasar descargas eléctricas a través de una mezcla de amoníaco, hidrógeno y metano contenida en una probeta llena de agua destilada. Las sustancias químicas representaban los componentes de nuestra atmósfera primitiva, y las descargas emulaban el papel de las tormentas eléctricas. Al cabo de tan sólo una semana, el agua había adoptado un color rojo profundo y, además de ácidos simples, contenía también aminoácidos, las moléculas orgánicas que constituyen la materia prima para la construcción de las proteínas, componente vital de los seres vivos.

En esta mezcla química se supone que comenzó la vida. Posteriormente, se descubrió que también otros elementos químicos podían transformarse en moléculas orgánicas bajo condiciones similares. Entre ellos se incluyen los azúcares y los nucleótidos (componentes del material genético ADN).

Aunque esta teoría resulta factible, nos plantea problemas de tiempo. Los hallazgos fósiles sugieren que hace al menos 3.200 millones de años vivían ya en la Tierra organismos simples tales como bacterias y algas. No obstante, a pesar de su simplicidad biológica, debió de tratarse de organismos de composición química relativamente compleja. La primera síntesis de los componentes químicos básicos había tenido lugar no más de mil millones de años antes.

Evidentemente, la síntesis de los aminoácidos pudo haber tenido lugar antes de esos 4.200 millones de años. Y la de materiales complejos pudo haber experimentado un desarrollo más rápido que los cambios evolutivos subsiguientes, a juzgar por los restos de fósiles hallados. También es posible que la materia necesaria para ello llegara del espacio.

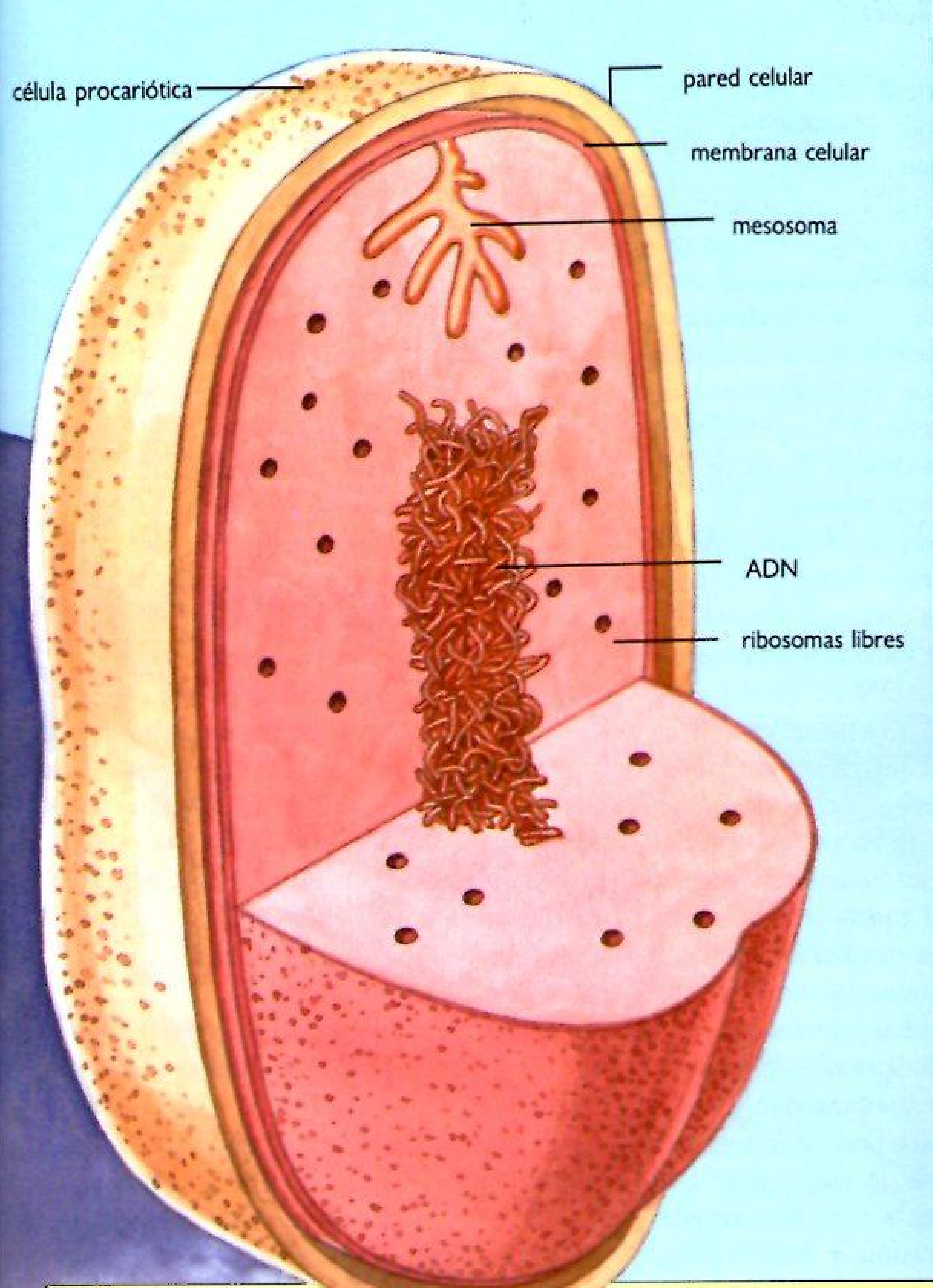
__La génesis de la vida__ pudo haberse producido hace unos 4.000 millones de años, al reaccionar la energía eléctrica procedente de las tormentas con la atmósfera de metanol, amoníaco, monóxido de carbono, dióxido de carbono y agua produciendo aminoácidos tales como fenilalanina, triptófano, histidina, glicina y valina.

A finales de los años sesenta, los radioastrónomos descubrieron la existencia de moléculas orgánicas en nebulosas oscuras. Desde entonces, se ha considerado muy seriamente la posibilidad de que moléculas aún más complejas hayan llegado a la Tierra procedentes del espacio. Dichas moléculas debieron proceder de una fuente científicamente factible, y haber sobrevivido al riesgo de destrucción por radiaciones de onda corta durante el trayecto hasta nuestro planeta. Existen dos modos posibles en los que podrían haber viajado: en meteoritos o en polvo de cometa.

El análisis de un meteorito caído sobre la Tierra en 1969 ha demostrado que contenía al menos 74 aminoácidos. Los más escépticos sugieren que debió de contaminarse como resultado de su caída, pero lo cierto es que los 74 aminoácidos mostraban tanto similitudes como diferencias con respecto a los terrestres. Sus átomos pueden ligarse a la cadena interna de carbono de la molécula tanto al derecho como al revés. Los aminoácidos terrestres son «zurdos», pero el meteorito presentaba formas tanto zurdas como diestras.

Hace unos 70 millones de años, un cometa gigante dejó un rastro de meteoritos y polvo a su paso por el sistema solar. Unos 20.000 años después, un meteorito procedente de aquel cometa aterrizó en Stevns Klint, en la costa de Dinamarca, suceso que hoy conocemos gracias al estudio de las rocas cretácicas y terciarias formadas durante aquel período. No obstante, la Tierra había comenzado a impregnarse de polvo procedente del cometa 15.000 años antes del impacto, y continuó haciéndolo durante miles de años después.

Se ha sugerido que todos los aminoácidos presentes en el meteorito se habrían visto destruidos por el impacto, aunque sí se habrían conservado en el polvo del cometa. Este polvo podría haber traído a la Tierra aminoácidos que, de hecho, se han detectado a algunas decenas de centímetros por debajo de la frontera que divide a las rocas cretáceas y terciarias.



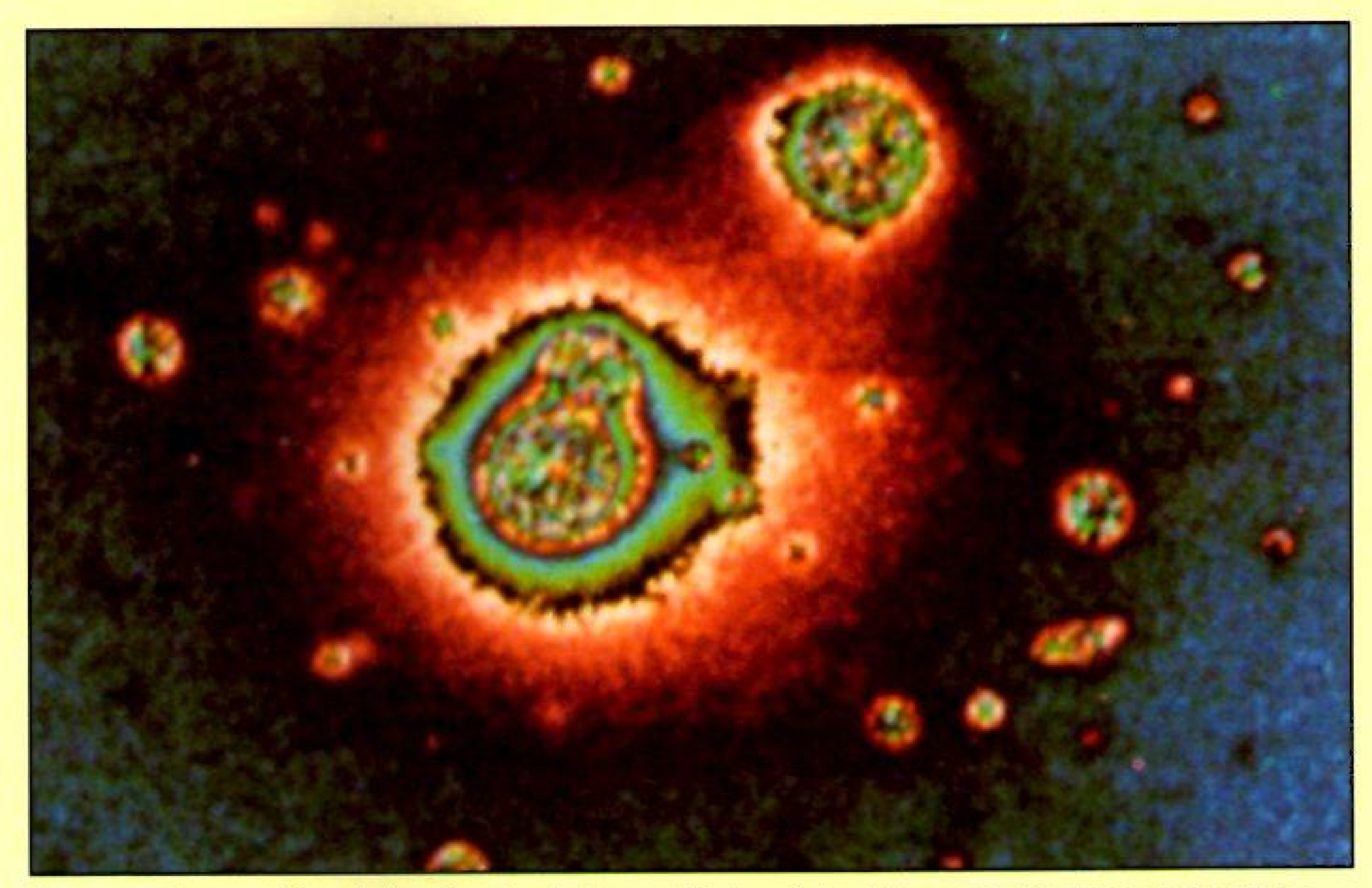


***Las primeras evidencias de vida sobre la Tierra** aparecen en fósiles de hace 3.800 millones de años. Consistían en organismos unicelulares conocidos como células procariotas. Estas no contaban con un núcleo claramente definido. Gran parte de su actividad química se desarrollaba en puntos denominados mesosomas, consistentes en aberturas plegadas de la membrana celular.*

***Los científicos han demostrado en el laboratorio** que los fosfolípidos —moléculas con un extremo soluble en agua y otro en grasa— forman estructuras globulares de varias capas llamadas liposomas al contacto con el agua (arriba). La pared exterior del liposoma es una membrana, y la aparición de las membranas celulares tuvo tanta importancia en la evolución de la vida como el ADN.*

Las moléculas del espacio

Cuando el cometa Halley (derecha) se aproximó a la Tierra en 1986, las observaciones realizadas por las naves espaciales mostraron que el núcleo central de la cabeza del cometa se hallaba lo suficientemente protegido como para albergar la sustancia conocida como formaldehído. Dicha sustancia podría haber servido de base para el desarrollo de muchas otras moléculas orgánicas. Poco a poco, se van reuniendo nuevos datos que muestran que las condiciones presentes hoy en el cometa Halley podrían también darse en los grandes meteoritos que alcanzan la Tierra, y que podrían llegar hasta nosotros sustancias orgánicas en el «polvo» de los cometas interceptado por la Tierra en su movimiento orbital.



***Los cometas podrían haber incubado** las moléculas de la vida, protegiéndolas en su núcleo.*

LAS MOLÉCULAS DE LA VIDA

• *Las reacciones vitales*

Los atributos esenciales de la vida se desarrollan a través de las propiedades bioquímicas de las moléculas basadas en el carbono. Dichas moléculas existen en una amplia variedad de formas, pero entre las más significativas se encuentran los aminoácidos, que se unen y pliegan en forma tridimensional para formar proteínas. Estos aminoácidos poseen 20 configuraciones químicas. La disposición de sus átomos no sólo incluye el carbono, sino también hidrógeno, oxígeno y nitrógeno. También el azufre es, junto con el hierro y el fósforo, un ingrediente común de las proteínas.

Las proteínas desempeñan funciones fundamentales en la formación y mantenimiento de la materia viva. Las estructurales, por ejemplo, forman los bloques materiales de las células vegetales y animales. Otras proteínas son las encargadas de controlar las reacciones químicas que tienen lugar en las células. En esta última función desempeñan el papel de catalizadores, facilitando y acelerando las reacciones bioquímicas de las que depende el mantenimiento de la vida.

Las proteínas catalizadoras de los sistemas vivos se llaman enzimas, y cada enzima específica controla una reacción bioquímica determinada. La cadena de aminoácidos que forma la espina dorsal de la proteína se halla tan plegada que encaja exactamente con el elemento químico sobre el que debe actuar la enzima.

Si bien sólo existen 20 aminoácidos, la variedad de reacciones que hacen posible es colosal. Una proteína que contenga tan sólo 10 moléculas de aminoácidos dispondría de 100 trillones de alternativas de comportamiento. De hecho, las proteínas reales nunca poseen menos de varios cientos de aminoácidos en sus cadenas, lo que hace que las posibilidades de actividad bioquímica resulten virtualmente infinitas.

Además de proteínas, todos los cuerpos vivos contienen ácidos nucleicos, entre los que se incluye el ácido desoxirribonucleico o ADN. Esta gran cadena de moléculas orgánicas, larga y relativamente simple, se compone de unidades químicas, cada una de las cuales contiene un fosfato y un azúcar. Cada azúcar se halla unido por un lado a una base o grupo de átomos caracterizados por ser solubles en agua y por reaccionar con los ácidos para formar sales. El ADN tiene como bases cuatro moléculas químicas denominadas adenina, citosina, guanina y timina.

Cada sección del ADN —el fosfato, el azúcar y la base— se conoce con el nombre de nucleótido, y la disposición de conjunto de la molécula de ADN adopta la forma de una hélice. Aunque puede contener hasta 300 millones de átomos y estirada podría alcanzar un metro de longitud, ocupa muy poco espacio debido a que se encuentra plegada sobre sí misma.

En la mayor parte de las células, el ADN se concentra en los cromosomas o elementos en forma de barra contenidos en el núcleo. A lo largo de se hallan dispuestos los genes o unidades de ADN en estado puro en las que se encuentra la información codificada destinada a construir y mantener un organismo completo.

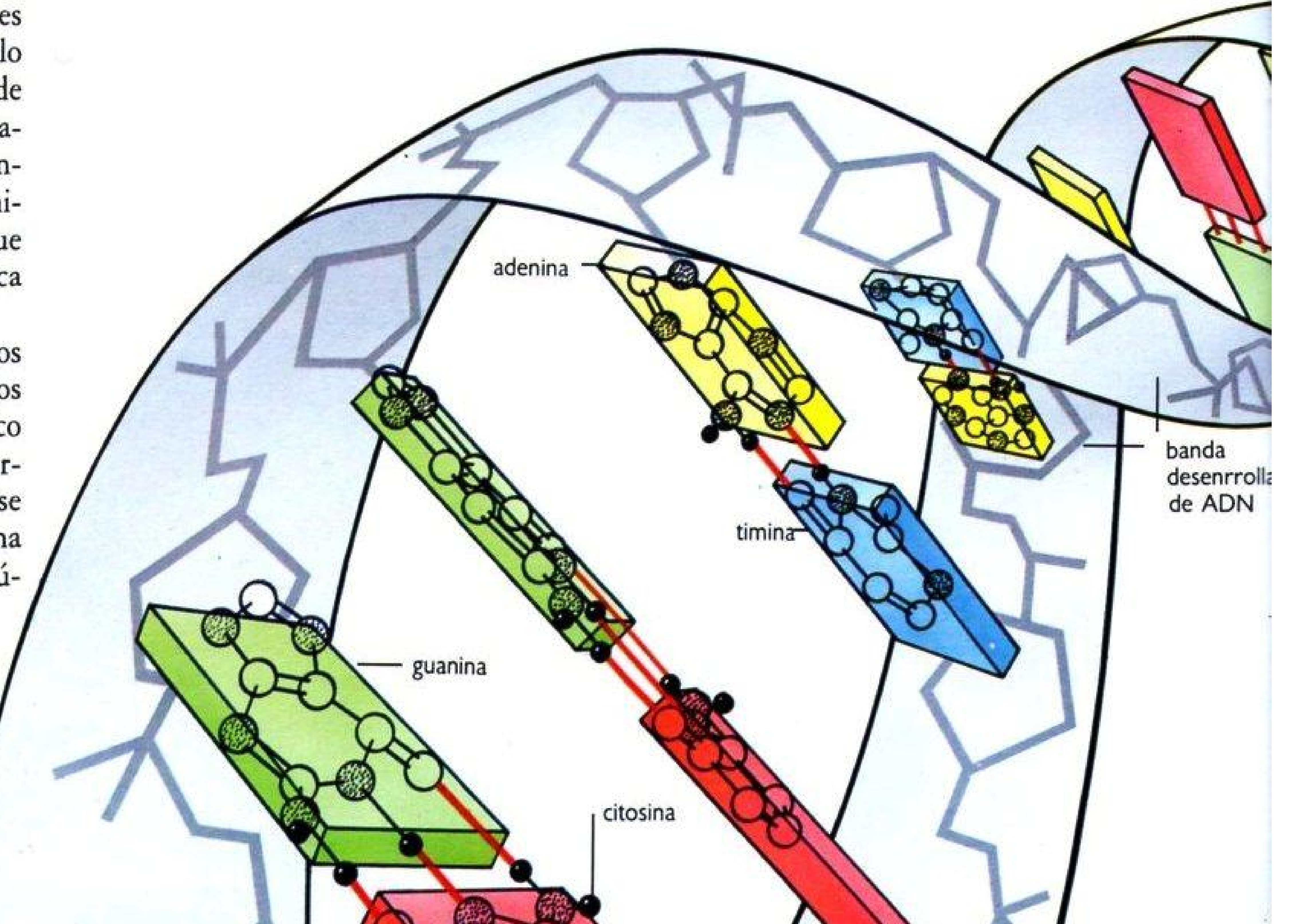
El código genético se encuentra detallado en la secuencia de átomos del ADN. El ADN funciona de tal modo que cada gen codifica la producción de una enzima que controla ciertas reacciones del interior de la célula. Los genes pueden controlarse mutuamente funcionando a modo de conmutador de «encendido» y «apagado».

El ADN no sólo hace posible la singular síntesis bioquímica de la vida, sino que también permite llevar a cabo los procesos vitales de autorreparación y autoduplicación. En la forma más simple de reproducción —la creación de una copia exacta de una célula— la doble hélice se despliega y se le añade una nueva copia de la cadena complementaria, de tal modo que se forman dos nuevas cadenas idénticas antes de la división de la célula. El proceso es similar en la reproducción sexual, aunque en este caso se ve complicado por las mezclas e intercambios de material genético.

Si bien las mezclas del paquete genético tienen como resultado cambios en el aspecto o fenotipo de cada individuo, no se debe a ninguna alteración del material genético. Los cambios genéticos o mutaciones constituyen una alteración permanente de la secuencia de nucleótidos del ADN.

Las mutaciones, que pueden surgir espontáneamente o ser causadas por influencias ambientales tales como la radiación o ciertas drogas, pueden resultar perjudiciales para los organismos y causar graves deformidades congénitas. Pueden tener asimismo efectos beneficiosos, logrando que un organismo se adapte mejor a sus circunstancias. Así, las mutaciones hacen posible la evolución.

Aunque incluso las bacterias unicelulares son capaces de reproducirse de modo independiente, no sucede igual con los virus, cuya duplicación de ADN depende de factores externos. Un virus sólo puede reproducirse sirviéndose de los elementos químicos de un huésped apropiado, esto es, otra célula viva. Para ello, «secuestra» el ácido ribonucleico o ARN de la célula, una mo-



lécula mensajera similar al ADN empleada en la síntesis y duplicación de proteínas.

El virus es un «híbrido» entre lo vivo y lo no vivo. Los virus aislados pueden agruparse entre sí, adoptando el aspecto de trozos de cristal inanimado. Sin embargo, contienen en su interior suficiente ADN —la molécula de la vida— para emitir los códigos necesarios para existir en condiciones favorables. Han llegado a establecerse conjeturas acerca de la posibilidad de que los virus provengan del espacio.

La duplicación celular *(derecha) implica la transferencia de una copia detallada de toda la información genética a las células recién nacidas. Al desenrrollarse dos cadenas de nucleótidos del antiguo ADN, nuevas cadenas son sintetizadas sobre sus superficies.*

La molécula de ADN *se compone de dos cadenas de nucleótidos. Las cadenas se mantienen unidas por puentes de hidrógeno entre nucleótidos adyacentes. La estructura de doble cadena aparece arrollada sobre sí misma formando la célebre forma de doble hélice.*

par de cromosomas

ADN superarrollado

Para fabricar proteínas, *las bandas de ADN se separan y las moléculas de polimerasa del ARN construyen sobre ellas cadenas de ARN mensajero (ARNm).*

polimerasa de ARN

espina dorsal del ADN

bases individuales

transcripción

El ARN mensajero recién sintetizado *abandona el núcleo de la célula.*

El ARN mensajero viaja hasta un ribosoma *en el que otra molécula llamada ARN transmisor (ARNt) lee la secuencia de bases en grupos de tres, llamados codones. Cada uno de dichos codones corresponde a uno de los 20 aminoácidos de la célula, los cuales, dispuestos en el orden correcto, constituyen la proteína.*

aminoácido

conjunto de proteínas

aminoácidos

ARN mensajero

ARN transmisor

Los puentes en la molécula de ADN *(izquierda) se forman entre moléculas de los nucleótidos timina (Y) y adenina (A), así como entre citosina (C) y guanina (G). El orden de dichos nucleótidos a lo largo de la doble hélice suministra el código necesario para la fabricación de proteínas. La secuencia visible en la ilustración es GGAT a lo largo de una banda de la hélice y CCTA a lo largo de la otra.*

ribosoma

envoltura del núcleo

EL DOMINIO DEL PLANETA

• *El ámbito de la vida*

La célula es la unidad universal de vida. Tanto aisladas como organizadas en grupos, las células son la sustancia de todos los animales y plantas vivientes que habitan el planeta. Todas las células tienen esencialmente la misma organización, las diferencias son sólo en los detalles. Cada célula posee una cubierta exterior o membrana que es, en realidad, un emparedado de capas de proteína y de glóbulos de grasa. A través de ella, las sustancias entran y salen de la célula. En las plantas, esta membrana está recubierta por una vaina de celulosa que le proporciona rigidez.

La célula está llena de una sustancia gelatinosa o citoplasma en la que reposan las «partículas» subcelulares o inclusiones. Estas intervienen en la generación de energía la fabricación de grasas y proteínas. Muchas de estas proteínas actúan a modo de catalizadores, desencadenando otras reacciones químicas bien en el interior de la célula, bien en otras células adyacentes. Otras inclusiones son las encargadas de digerir las sustancias que penetran en la célula, incluyendo las sustancias nocivas.

En el corazón de la célula descansa el núcleo. En su interior se conserva el material genético que, combinado con las proteínas, forma los cromosomas. Desde allí se orquestan todas las actividades de la célula: sin el núcleo, la célula moriría.

A diferencia de las células animales, las células vegetales contienen inclusiones conocidas como cloroplastos. En su interior existen diminutos depósitos de un pigmento verde —la clorofila— que permite a las plantas utilizar la energía solar para formar carbohidratos mediante el proceso de la fotosíntesis.

Las primeras células que emergieron del caldo primigenio y existieron de modo independiente sobre la Tierra hace unos 4.000 millones de años eran bacterias que se «alimentaban» de las moléculas orgánicas presentes en su rico entorno químico. De ellas evolucionaron probablemente las primeras plantas, similares a las algas unicelulares de nuestros días.

La fotosíntesis de las plantas primitivas hizo aumentar el contenido de oxígeno del agua en la que vivían (el oxígeno es un producto de desecho de la fotosíntesis). Sólo entonces fue posible la vida animal, que depende del oxígeno para su existencia.

***La historia evolutiva aparece reflajada** en el estudio del ADN. Un gen hallado en gran número de especies controla la producción de una enzima llamada citocromo oxidasa. Dicha molécula interviene en el aprovechamiento del oxígeno por las células de modos diferentes según cada criatura, por lo que su huella de ADN es también distinta. El grado de similitud entre las versiones del gen entre distintos organismos nos proporciona una idea fiel del grado de relación que los une. Este mapa de la historia evolutiva de ciertas especies se halla basado en la similitud de sus genes de citocromo oxidasa.*

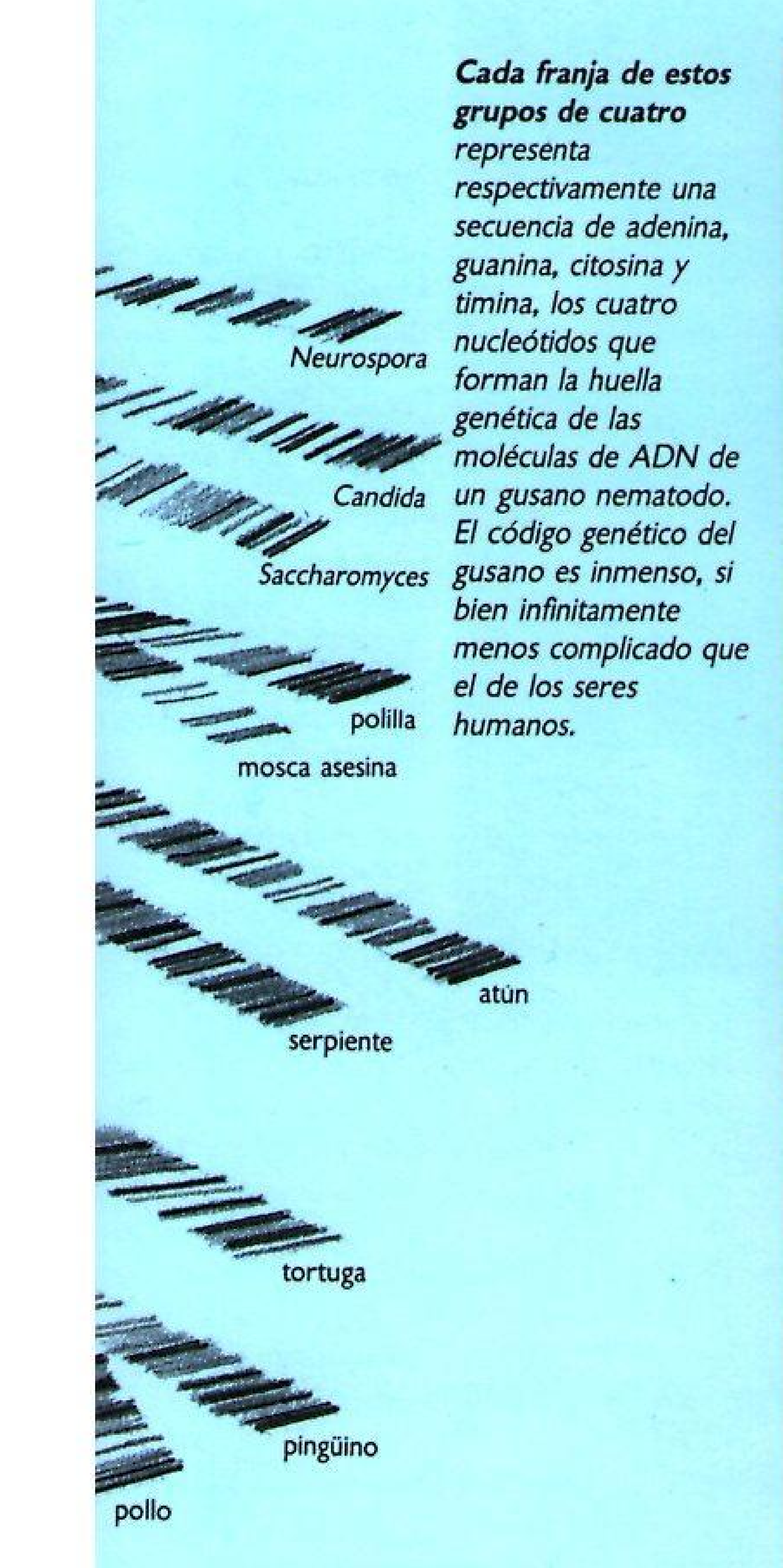
Las formas más complejas de vida tardaron muchos millones de años en evolucionar. Gradualmente, fueron desarrollándose organismos multicelulares dotados de células especializadas en tareas tales como la reproducción, el sentir y el reaccionar ante el medio. En el período cámbrico, que comenzó hace unos 560 millones de años, existían ya organismos complejos tales como grandes plantas y animales marinos.

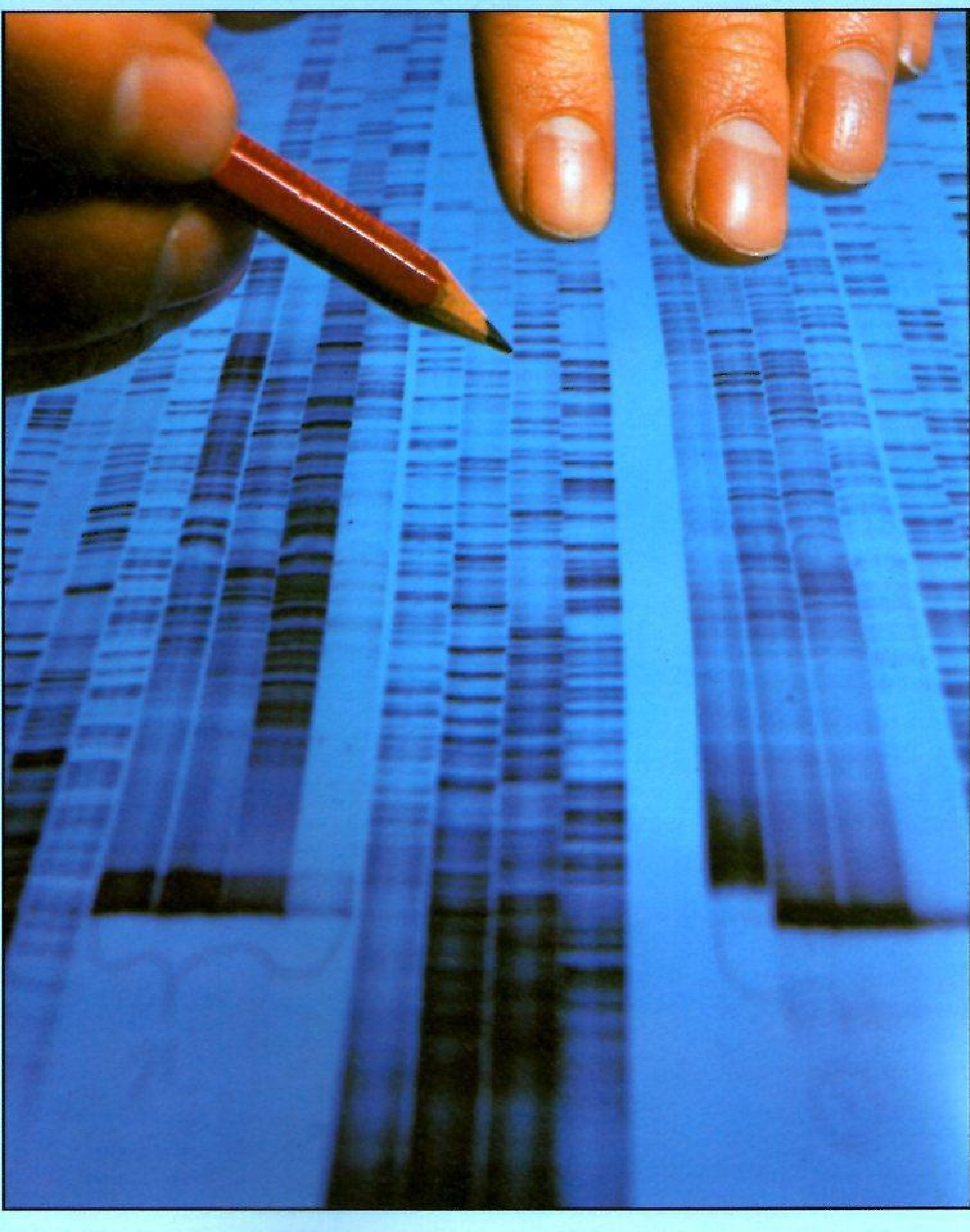
A medida que la evolución avanzaba hacia una nueva era, prosperaron y proliferaron los corales y los trilobites, a los que siguieron los primeros peces. No obstante, los océanos eran la única reserva de vida. Las masas continentales de tierra, unidas entonces en un sólo continente, permanecían desiertas.

Las primeras plantas terrestres aparecieron hace unos 400 millones de años, marcando el comienzo del período devónico. Evolucionaron de distintas formas, desde pequeños musgos a gigantescos helechos arbóreos, causando un cambio drástico en las condiciones en las que habría de desarrollarse la vida sobre la Tierra. La atmósfera recibió un suministro constante de oxígeno, lo que hizo posible que poblaran el planeta los primeros animales terrestres: insectos, peces pulmonares y primeros anfibios.

El período carbonífero, comenzado hace unos 354 millones de años, contempló la aparición de los primeros reptiles e insectos alados. Estos últimos evolucionaron a la par de las plantas con flores, cuya fertilización hacían posible.

Los sucesivos períodos de vida prehistó-





Cada franja de estos grupos de cuatro *representa respectivamente una secuencia de adenina, guanina, citosina y timina, los cuatro nucleótidos que forman la huella genética de las moléculas de ADN de un gusano nematodo. El código genético del gusano es inmenso, si bien infinitamente menos complicado que el de los seres humanos.*

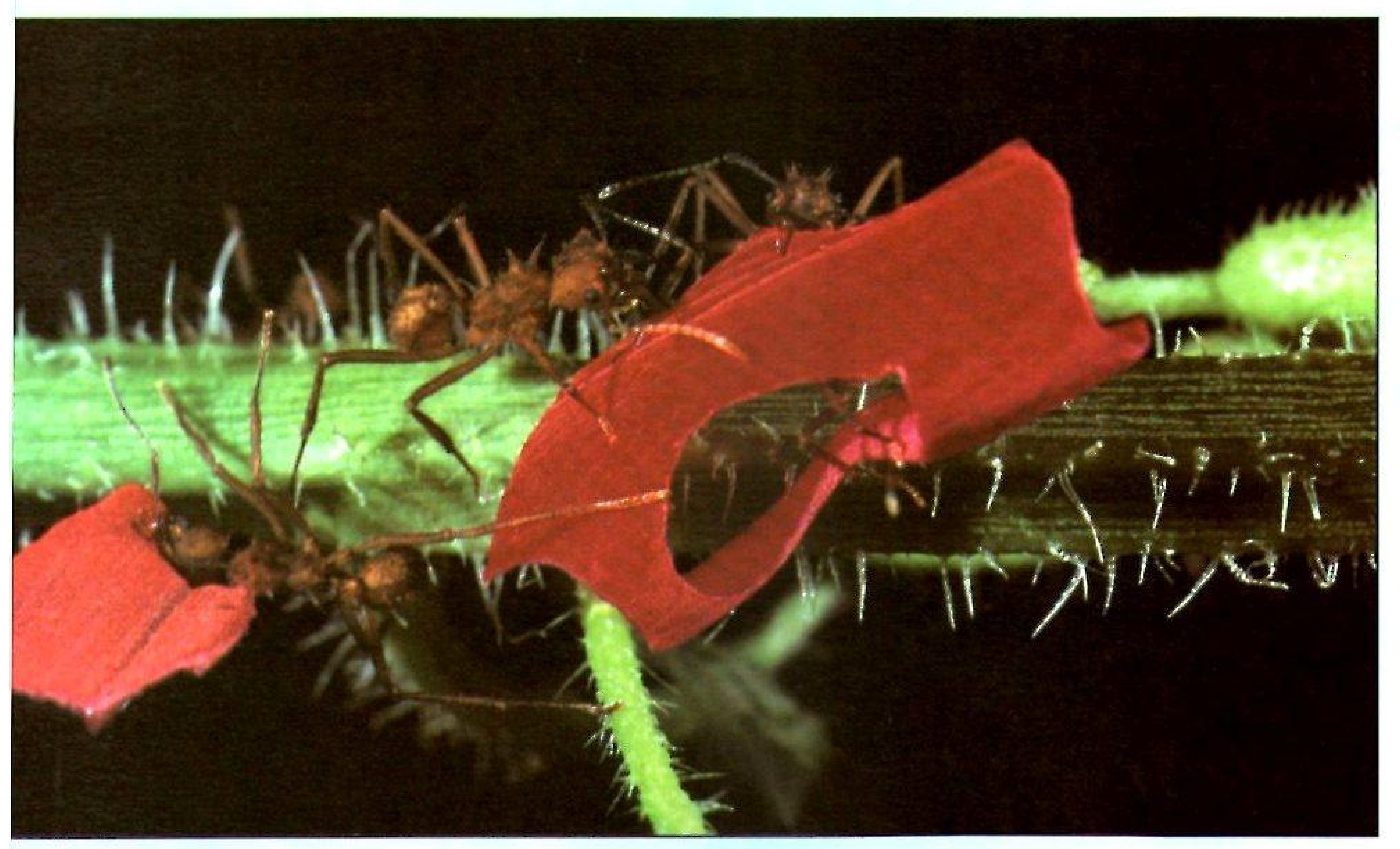
rica experimentaron una colonización gradual de todos los rincones de la Tierra por parte de los animales y las plantas. Entre otros acontecimientos significativos cabe incluir la aparición de los primeros peces de agua dulce, el auge de los reptiles, la era de los dinosaurios, la aparición de las primeras aves y, momento crucial en la evolución, la aparición de los mamíferos.

El auge progresivo de los mamíferos no tuvo lugar hasta que la era de dominación de los reptiles llegó a su fin —hace unos 65 millones de años—, debido al impacto de un enorme cometa en la Tierra y a los cambios climáticos resultantes. Los primeros mamíferos eran criaturas pequeñas y ratoniles; con el tiempo, sin embargo, se diversificaron hasta formar los animales que hoy conocemos, incluyendo los mamíferos ungulados y los primates. Los primeros antepasados del hombre no surgieron sobre la Tierra hasta hace unos 4 millones de años.

Si bien eran relativamente pequeños comparados con los enormes dinosaurios cuyo territorio conquistaron, estos mamíferos constituyeron el mayor éxito de la evolución. Ello se debió al alto grado de encefalización de los mismos. El resultado fue un nivel de inteligencia mucho mayor que el de cualquier otra especie anterior.

Entre los mamíferos, son los humanos quienes muestran mayor grado de encefalización, lo que se refleja en su comportamiento. El fenómeno no es exclusivo de los primates. Las ballenas y delfines, por ejemplo, poseen un grado relativamente alto de encefalización cuyo desarrollo, sin embargo, parece haber cesado hace entre 20 y 30 millones de años. No se sabe con certeza por qué se detuvo el crecimiento cerebral de los grandes mamíferos marinos, aunque podría deberse al hecho de que la encefalización parece exigir un sistema corporal capaz de producir gran cantidad de energía o, dicho de otro modo, un elevado nivel metabólico. El mismo factor influyó en la extinción de los dinosaurios.

La encefalización necesita largos períodos de gestación para las crías que nacen prácticamente inútiles y deben soportar un largo período de aprendizaje para «entrenar» sus cerebros. Si bien cabe considerar este hecho como un inconveniente evolutivo (las crías indefensas siempre constituyen presas fáciles), también es cierto que posee la ventaja de que ofrece a largo plazo la habilidad y versatilidad de cualquier cerebro de



Las hormigas parecen mostrar una gran inteligencia *cuando trabajan conjuntamente en favor de la comunidad. Sin embargo, se trata de criaturas dotadas de habilidades estrictamente limitadas. Estas cortadoras de hojas, por ejemplo, se hallan «programadas» para realizar su tarea y no son capaces de pensamiento individual alguno, lo que resulta evidente al observar sus errores: si una, por ejemplo, deja caer una hoja, no logra idear el modo de recogerla, sino que comienza de nuevo su tarea, regresando a la planta para cortar otra.*

gran tamaño, y los humanos han utilizado el suyo para manipular su entorno según sus necesidades. La ciencia, la tecnología y la medicina hacen posible que los niños se hallen sumamente protegidos contra accidentes, enfermedades y otros riesgos que amenazan su desarrollo.

Tal y como la ha desarrollado el *Homo sapiens,* la inteligencia ha producido enormes diferencias entre los mamíferos más avanzados y las sociedades humanas menos desarrolladas. Los simios pueden ser hábiles en cuanto a imitación se refiere, e incluso capaces de «razonar» lo bastante como para servirse de una silla para alcanzar un plátano inaccesible de otro modo.

Además, el ser humano destaca especialmente en lo que respecta a la comunicación. Ciertamente, los animales pueden comunicarse entre sí y, de hecho, lo hacen, si bien de un modo mucho más restringido que los miembros del género humano. Algunos insectos comunitarios —como, por ejemplo, las abejas— son célebres por su capacidad de transmitir información, cosa que logran mediante la realización de peculiares danzas que informan al resto de los miembros de la colmena dónde pueden hallar alimento. Si bien se trata de un proceso relativamente complejo, se trata de lo único que las abejas pueden «contarse». También las hormigas poseen un elaborado sistema de comunicación que sólo se utiliza con propósitos específicos.

Incluso entre las aves y los mamíferos, la comunicación es algo estrictamente limitado y centrado en gran medida en torno a las cuestiones esenciales para la supervivencia: evitar a los depredadores, hallar una pareja y sacar adelante a las crías. Sin embargo, existen numerosas criaturas entre las cuales la comunicación se sirve de elementos tales como el olfato, el lenguaje corporal y las expresiones faciales, esto último fundamentalmente en los primates.

Estas formas de comunicación son también importantes para los seres humanos. Sin embargo, lo que nos distingue de nuestros vecinos terrestres —y, posiblemente, de cualquier otro habitante de la galaxia y del universo— es nuestra notable capacidad para el lenguaje, no sólo hablado sino también técnico y abstracto. La invención de vocabularios especializados para su aplicación técnica ha permitido a los seres humanos un avance vedado a otras criaturas menos inteligentes. Asimismo, hemos descubierto el modo de conservar la información en forma escrita, grabada, etc.

Al igual que sucede con otros rasgos humanos, el uso del lenguaje depende de un cerebro dotado de una gran capacidad de memoria, aprendizaje, razonamiento y abstracción altamente desarrollada. Tan sólo en el cerebro existen unos 15.000 millones de células nerviosas o neuronas, dedicadas a procesar la información recibida a través de los ojos, los oídos y el resto de los órganos sensoriales, así como de los músculos y otros órganos internos que hacen que nuestro cuerpo «funcione».

Empero, la mente no puede funcionar por sí sola. Para actuar como centro de control del cuerpo humano precisa complicados mecanismos de asistencia que ayudan a vigilar el entorno y desempeñar las tareas que éste exige. Así, no resulta casual que el cerebro humano sea una unidad central de procesamiento conectada mediante «cables» con todas aquellas partes del cuerpo que reciben y transmiten información.

Dicho sistema de cables no es sino el sistema nervioso y las neuronas que lo forman. Cada neurona actúa a modo de receptor, conductor y transmisor de señales nerviosas y unidades eléctricas y químicas de información que, en conjunto, suministran todos los datos necesarios para controlar y regir toda actividad humana.

La principal *autopista* nerviosa que conduce al cerebro es la médula espinal, conectada con todas las partes del cuerpo por medio de nervios cada vez más delgados a medida que se expanden por los distintos órganos y tejidos. El cerebro se alimenta de mensajes procedentes de los órganos sensoriales; los mensajes motores son transmitidos hacia el exterior, y proporcionan instrucciones a los tejidos y órganos acerca de cómo deben actuar.

Asimismo, el sistema nervioso se halla dividido en dos subsistemas, uno situado a nivel consciente y el otro involuntario o autónomo. Ello tiene la ventaja de que el sistema autónomo asume las actividades esenciales para la supervivencia, tales como la respiración y la digestión, actos que realizamos sin necesidad de proponérnoslo.

La habilidad para resolver problemas *constituye una de las más asombrosas facultades humanas. El proceso requiere a menudo de conceptos complejos, de diversas habilidades y de numerosa información de base. Lo más curioso es cómo los seres humanos descubren a menudo nuevas y originales soluciones para los problemas con los que se enfrentan.*

1



Nicolás Copérnico *resolvió uno de los grandes misterios de su época (1) al estudiar la matemática de los movimientos de las estrellas y los planetas. De hecho, halló para el fenómeno una explicación más razonable que la teoría geocéntrica imperante.*

2

3

La resolución de un problema tan complejo *exigía un profundo conocimiento de los hechos sabidos y de las teorías previas, y su búsqueda se vio influida por la perspectiva filosófica y religiosa de Copérnico (2). El éxito de la solución del problema exigía una capacidad de razonamiento abstracto y de cálculo matemático.*

La solución hallada por Copérnico *era que el Sol, y no la Tierra, constituía el centro del sistema solar (3). Su teoría se publicó en 1543, el año en que murió, pero, al igual que toda nueva idea, no logró convertirse en patrimonio común hasta que no hubo sobrevivido a las críticas de sus colegas.*

LA COMUNICACIÓN UNIVERSAL

• *¿Hay alguien ahí?*

La capacidad de servirse de métodos complejos de comunicación es uno de los factores especiales que diferencian a los seres humanos del resto de las criaturas de nuestro planeta. Adicionalmente, nuestros poderes de comunicación hacen también posible que podamos entrar en contacto con otros organismos vivos del universo, si es que los hubiera.

Las posibilidades de que ello ocurra se han visto aumentadas por el desarrollo, a lo largo del siglo XX, de una tecnología capaz de establecer comunicaciones a través de largas distancias por medio de ondas de radio. Tan sólo éstas pueden lograr tal propósito: incluso el más poderoso haz de luz resultaría demasiado débil. La seriedad con que los científicos enfocan la cuestión de la comunicación interestelar queda reflejada por el hecho de que cuando en 1967 se descubrieron pulsos de radio procedentes del espacio, los radioastrónomos consideraron la posibilidad de que fueran mensajes codificados procedentes de otras civilizaciones.

Uno de los principales protagonistas de la comunicación interestelar, el astrónomo norteamericano Frank Drake, ha ideado los medios básicos destinados a establecer contacto con civilizaciones cuyos lenguajes pudieran ser totalmente distintos de los nuestros. El primero consiste en enviar un mensaje en forma de dibujos o diagramas, incluyendo en el mismo una explicación astronómica de la fuente de la que proceden. El segundo y más complicado exige el uso de la matemática, el único lenguaje que acaso podría ser universal.

El enfoque pictórico de la comunicación guarda ciertas semejanzas con formas pictográficas de escritura tales como las utilizadas por los antiguos egipcios y el estilo de escritura no alfabética desarrollado por los chinos. Éste fue el método empleado para lanzar el mensaje diseñado por Drake y por su compatriota Carl Sagan y transportado por el *Pioneer 10* en 1973.

La nave portaba una placa de oro anodizado en la que aparecían dibujados un hombre y una mujer, el primero alzando la mano en gesto de paz y bienvenida. Las figuras aparecían trazadas junto a un esbozo de la nave espacial con objeto de mostrar la escala adecuada. Asimismo, la placa contenía un diagrama del hidrógeno atómico (el elemento más simple) y un plano de los planetas del sistema solar en el que se mostraba la ruta de la nave espacial. También incluía la posición del Sol en relación con los 14 púlsares entonces conocidos. Los símbolos representaban los períodos de pulsación de cada uno de ellos. Así, la comparación de los mismos con sus valores en el momento en que la nave fuera descubierta permitiría a la civilización que los hallara calcular el momento del lanzamiento.

En las sondas *Voyager*, lanzadas cuatro años más tarde, Drake y Sagan incluyeron un disco de vídeo que contenía tánto información científica como información acerca del aspecto y los sonidos de la Tierra, incluyendo mensajes del secretario general de las Naciones Unidas y del presidente de los Estados Unidos, información hablada en distintos idiomas y diversos ejemplos musicales, desde Bach hasta la música de rock.

El segundo tipo de mensaje utiliza la aritmética binaria, sistema utilizado en todos los equipos digitales, desde ordenadores hasta reproductores de discos compactos, incluyendo la recepción de imágenes obtenidas en el espacio. El sistema binario «cuenta» sirviéndose de unos y ceros: el 01 equivale a uno, 10 equivale a dos, 11 representa el 3, 100 el cuatro y así sucesivamente. Si bien puede parecer un sistema incómodo, resulta ideal para el ordenador, ya que el 1 y el 0 representan conmutadores que pueden hallarse encendidos o apagados respectivamente.

A modo de experimento, Frank Drake se sirvió de este código para crear un mensaje que, una vez traducido, suministraría a cualquier ser inteligente toscas imágenes simbólicas del ser humano, del sistema solar y de las estructuras atómicas del carbono y el oxígeno. Para todo ello, necesitó tan sólo de 551 ceros y unos.

Aunque somos capaces de diseñar mensajes comprensibles por otras civilizaciones, así como de entender los que pudieran llegar hasta nosotros, la posibilidad de cualquier diálogo interestelar resulta remota si no por otro motivo por las inmensas distancias que habrían de cubrirse. Incluso si, por ejemplo, existieran planetas situados en órbita alrededor de la estrella de Barnard —situada a tan sólo 5,9 años luz de distancia— e incluso si en uno de ellos existiera una civilización altamente desarrollada, cualquier mensaje que enviáramos tardaría casi seis años en alcanzar su destino, tras lo cual habría que esperar otros seis para obtener respuesta.

Empero, no cabe contemplar con optimismo la posibilidad de que deba haber necesariamente civilizaciones de seres inteligentes a esa distancia. Si existieran civilizaciones de este tipo dentro de un ámbito de 100 años luz, cualquier respuesta a nuestros mensajes tardaría en llegar aproximadamente siete generaciones, y para recibirlo y comprenderlo no sólo sería necesario que sus integrantes fueran inteligentes, sino que hubieran alcanzado al menos el mismo nivel de tecnología que poseemos en la Tierra.





El lenguaje de las telecomunicaciones modernas *es el código binario, en el que tan sólo se emplean los dígitos 0 y 1. Por ejemplo, la nave espacial Voyager 2 (derecha) transformó sus imágenes de Tritón, el satélite de Júpiter, en números binarios para su transmisión a la Tierra. El proceso aparece reflejado en la secuencia de ilustraciones inferiores. La imagen (derecha) fue dividida en diminutos cuadrados denominados pixels. El brillo de cada uno de ellos aparecía representado por cualquier número entre el 0 —correspondiente al blanco— y el 255 del negro (centro). A continuación, los números eran convertidos en sus equivalentes binarios, formados por secuencias de ceros y unos, que eran transmitidos a su vez como una serie de pulsaciones de radio (izquierda). Un cuadrado blanco era un «1» y un cuadrado negro, un «0». De regreso a la Tierra, estas pulsaciones eran utilizadas para reconstruir la imagen original.*

Un mensaje con destino a las estrellas

En 1973, la imagen reproducida más abajo fue transmitida al espacio por el radiotelescopio gigante de Arecibo (Puerto Rico). Se hallaba dirigido a M13, un cúmulo globular formado por miles de estrellas. El mensaje contenía 1.679 pulsaciones que representaban «encendido» o «apagado», y consistía en una secuencia de elementos pictóricos en blanco y negro que sólo podía ser dispuesta de dos modos: como 23 hileras de 73 elementos o como 73 hileras de 23, si bien tan sólo el último ofrece una imagen inteligible.

El mensaje comienza con una demostración del modo en que se representan los números según el código binario. A continuación, sigue una lista de los números atómicos de los elementos hidrógeno, carbono, nitrógeno, oxígeno y fósforo. El resto de los números proporciona una idea aproximada de la composición de los nucleótidos —o materia prima del ADN y el ARN (págs. 160-161)— y una imagen de la molécula de ADN. Asimismo, se muestran imágenes de un ser humano y del telescopio de Arecibo junto con sus tamaños correspondientes expresados en función de las ondas de radio utilizadas.

Una enciclopedia codificada: *Los números binarios, del 10 al 1 (1). Números atómicos de ciertos elementos (2). Fórmula de los nucleótidos (3). Número de nucleótidos en el ADN humano (4). Molécula de ADN (5). Figura humana (6). Altura del ser humano (7). Población mundial (8). Sistema solar (9). Telescopio de Arecibo (10). Tamaño del telescopio (11).*

EL FUTURO DEL UNIVERSO

• *La influencia de la materia ausente*

Miren donde miren, los astrónomos no ven sino galaxias y quasars que se alejan de nosotros. Parecería lógico presumir que este movimiento habrá de mantenerse eternamente, y que las galaxias cada vez se mostrarán más posibles difusas. Sin embargo, la teoría de la relatividad y la cosmología derivada de ella muestran que el universo puede seguir tan sólo uno de los tres caminos en el futuro lejano.

La teoría general de la relatividad describe el espacio-tiempo como dotado de una cierta curvatura (págs. 18-19). La primera posibilidad es que esta curvatura sea mayor que cero, lo que no es sino una forma matemática de afirmar que el espacio es cerrado, pues se curva alrededor de sí mismo y resulta finito, aunque carente de límites. Así, el universo habría de expandirse hasta un máximo antes de converger de nuevo.

La segunda posibilidad es que la curvatura sea menor que cero. En este caso, el espacio se curvaría de distinto modo: poseería una geometría hiperbólica (pág. 18) y sería infinito: Las galaxias se separarían hacia el infinito. Lo mismo sucede si, tercera posibilidad, la curvatura fuera equivalente a cero, en cuyo caso se trataría de un espacio euclidiano y, una vez más, infinito.

Los astrónomos necesitarían observar de qué modo la expansión cambia con el tiempo. Sólo así podrían predecir con seguridad el futuro del universo. Así, querrían poder medir el modo en que el factor de escala del universo —esto es, la separación relativa de dos puntos dados— cambia con el tiempo. El factor de escala se halla relacionado con el corrimiento hacia el rojo, por lo que si medimos el corrimiento hacia el rojo de una galaxia o de un quasar podemos, en principio, obtener el factor de escala del universo en el momento en que dicha luz fue emitida. Sin embargo, ello no puede lograrse de un modo preciso con nuestro actual nivel de conocimientos.

No obstante, los cosmólogos pueden enfocar el problema desde otra perspectiva. El universo actual se encuentra dominado por la materia. La densidad de la materia es 1.000 veces mayor que la de cualquier radiación, cuyo componente principal son las ondas microondas. Los cálculos realizados apuntan que si la densidad del universo está por encima de un cierto valor crítico, su expansión se irá aminorando gradualmente hasta invertirse bajo el influjo de la gravedad. El universo se contraerá, juntando todos los cuerpos hasta concluir con un *Big Crunch* o Gran Implosión.

Si la densidad del universo no sobrepasa ese valor crítico, la gravedad no poseerá fuerza suficiente para detener a las galaxias, y el universo se expandirá eternamente.

Si la densidad fuera exactamente igual al valor crítico, las galaxias se pararían, si bien ello tendría lugar en un momento infinito del futuro. De hecho, también constituiría un caso de expansión permanente.

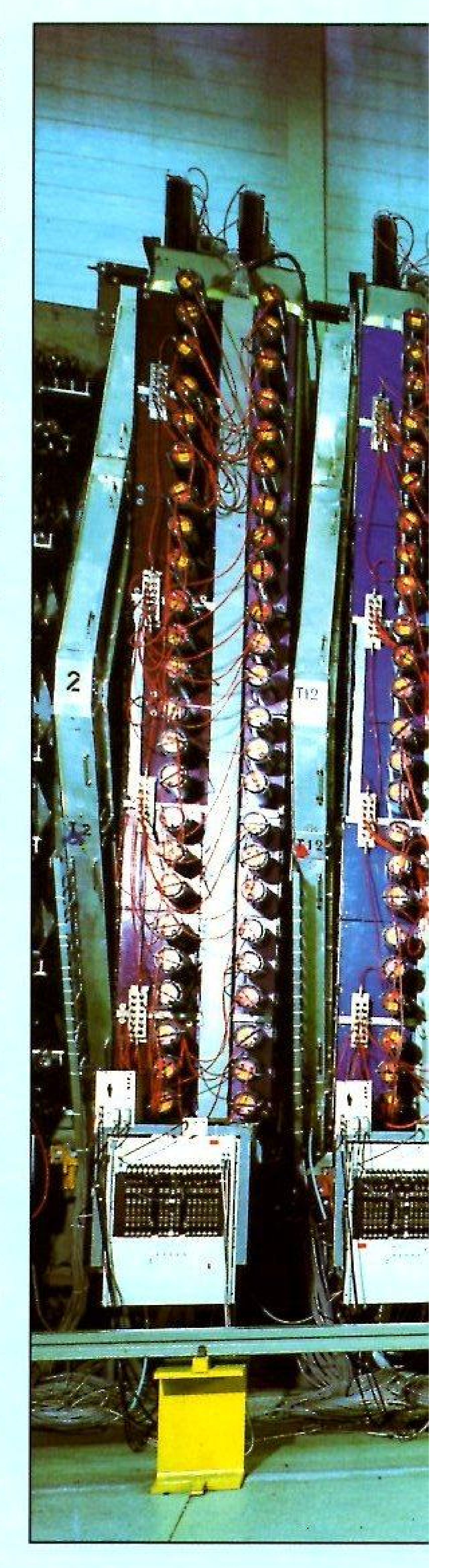
La cuestión es, por tanto, saber cuánta materia contiene el universo. Hasta hace poco, parecía que no existía materia suficiente para alcanzar la densidad crítica, pero las investigaciones más recientes parecen modificar este escenario.

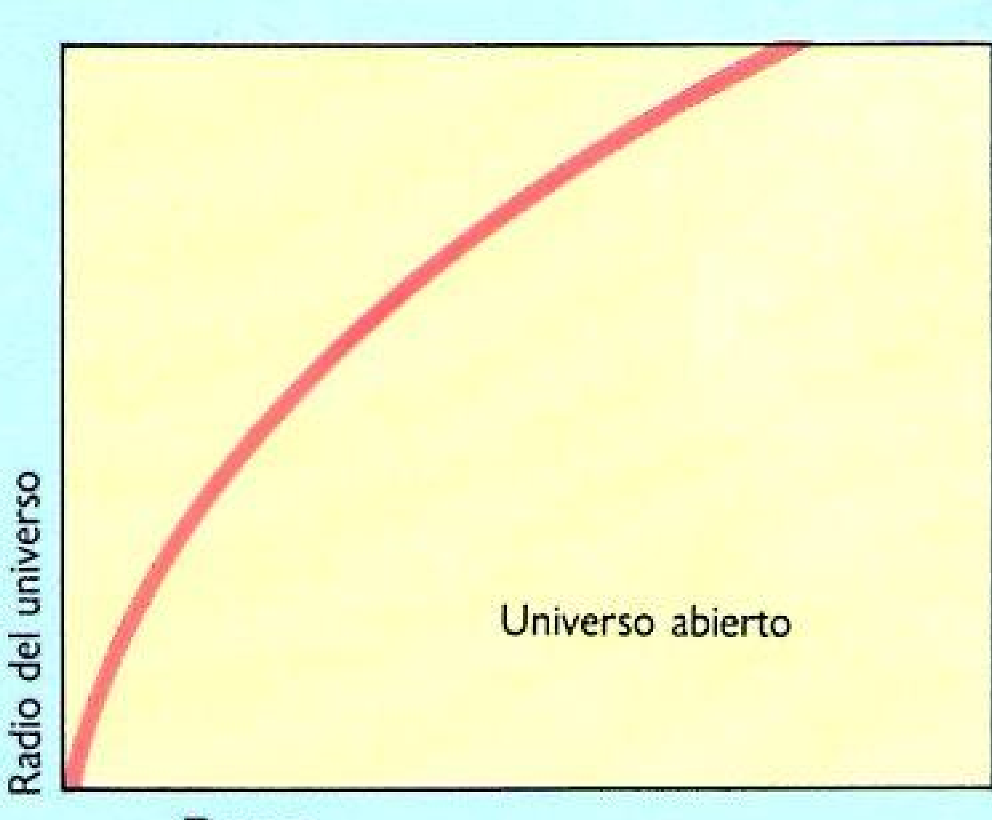
El estudio de diversas galaxias espirales demuestra que sus velocidades de rotación sólo pueden explicarse si poseen doble cantidad de materia de la que puede observarse con las imágenes de más larga exposición. Así, el reciente descubrimiento de tenues estrellas de masa reducida en nuestra galaxia parece indicar la ubicación de esa materia hasta ahora «ausente».

En el mismo sentido, parece ya innegable que los cúmulos de galaxias se hallan inmersos en materia intergaláctica, gran parte de la cual no puede ser detectada sino por medio de longitudes de onda no visuales. Ello añadiría gran parte de la materia necesaria para cerrar el universo; posiblemente, hasta cinco veces la cantidad de materia por cúmulo que originalmente se pensaba. Adicionalmente, las galaxias pueden contener un número indeterminado de agujeros negros de masa desconocida.

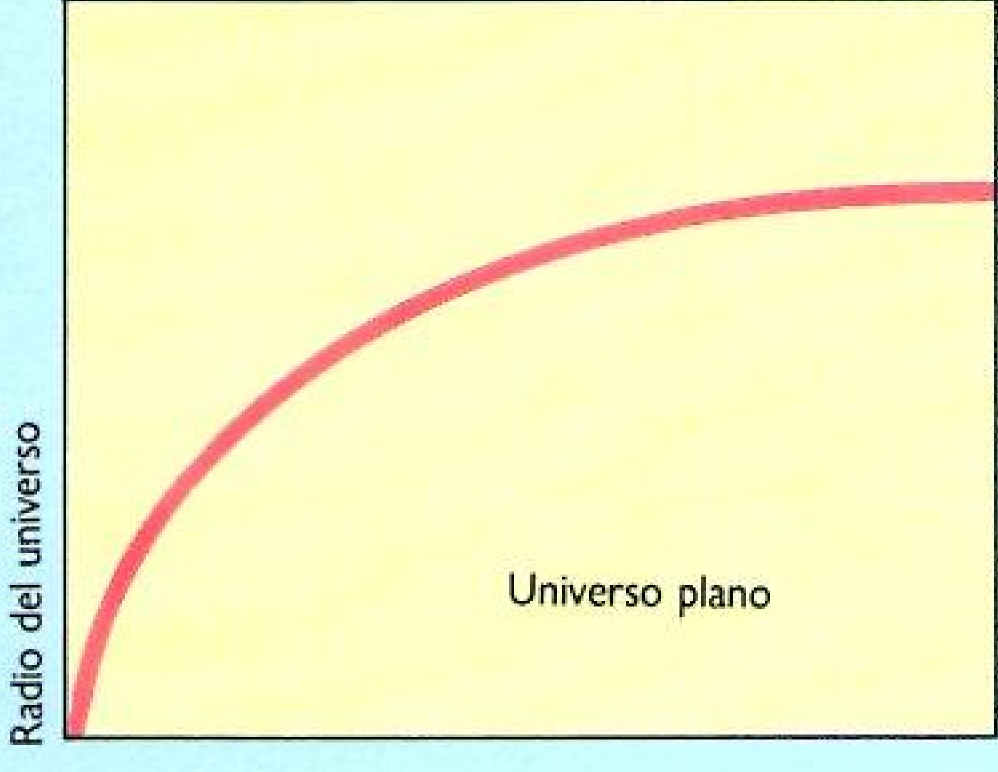
Por último, ignoramos hasta qué punto el espacio podría hallarse repleto de partículas aún no detectadas, tales como las WIMPs *(weakly interacting massive particles)*, o partículas masivas de baja interacción. Existe incluso la posibilidad de que los neutrinos que inundan el espacio posean cierta masa mínima.

Así, cabe la posibilidad de que dentro de algunos años descubramos que la densidad de la materia del universo rebasa el valor crítico. En tal caso, el futuro del universo será su retorno a un estado de concentración similar al que lo inició, posiblemente incluso a un nuevo *Big Bang*.

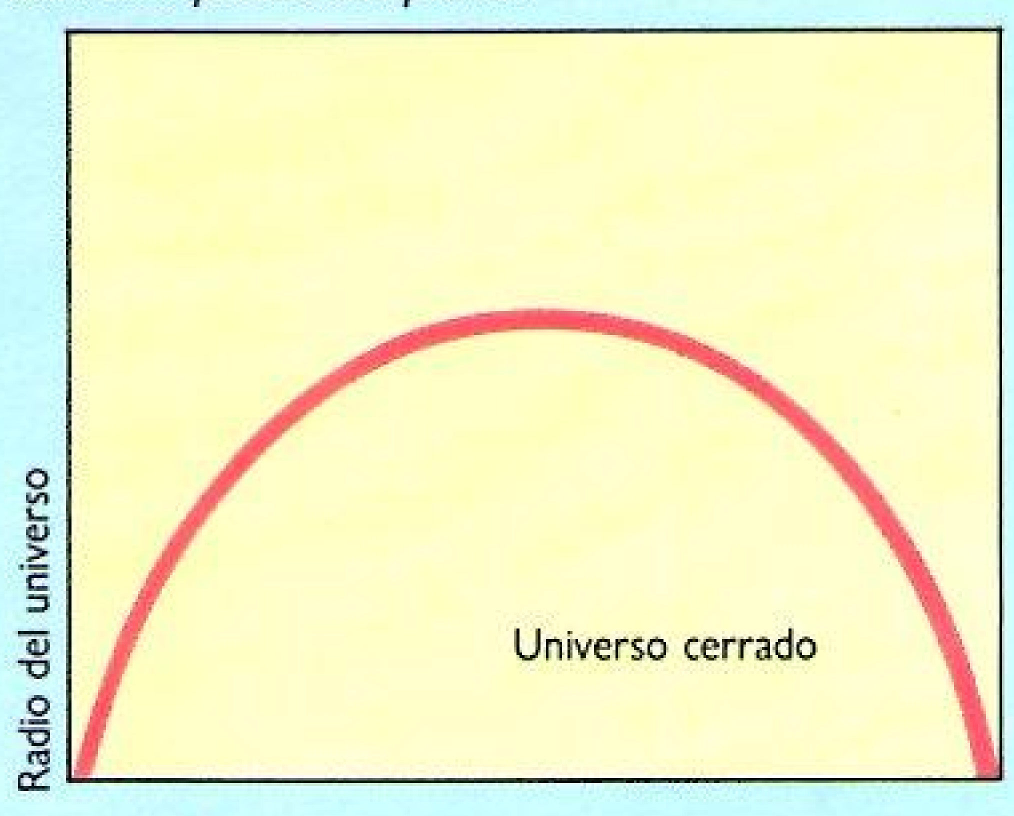




En un universo abierto, *la cantidad de materia existente no bastaría para detener su expansión, dado que su autoatracción gravitatoria no sería lo suficientemente fuerte. Si la materia detectable por sus efectos gravitatorios constituye la mayor parte de la existente, el universo sería abierto y se expandiría eternamente.*



En un universo plano, *la densidad se encuentra en su valor crítico, exactamente en la frontera entre la expansión y la contracción. Este universo sería infinito y euclidiano a gran escala; su expansión nunca llegaría a detenerse. La moderna teoría del* Big Bang *supone que el universo puede ser plano.*



Un universo cerrado *seguiría una futura implosión por su excesiva densidad.*

Los detectores de neutrinos *pueden arrojar cierta luz sobre el futuro del universo. Los neutrinos son partículas fantasmagóricas que recorren el universo. Su capacidad de reacción es tan baja que atraviesan todo un planeta sin interactuar con ningún átomo. El número de neutrinos es tan inmenso que la diminuta proporción de sus reacciones se convierte en un número contable. El detector de la foto se encuentra instalado en el CERN –Centro Europeo de Investigación Nuclear– de Ginebra. Cada reacción de neutrino un minúsculo destello de luz que es detectado por uno de los miles de tubos fotomultiplicadores situados en el exterior del sistema.*
Los experimentos realizados podrían revelar si los neutrinos poseen una masa propia que, en todo caso, sería infinitesimal. Pero podría ser suficiente para ayudar a frenar la expansión del universo y convertirla en una contracción.

EL FIN DEL UNIVERSO

¿Muerte o renacer?

Si el universo se halla destinado a expandirse para siempre, las siguientes líneas del poeta T. S. Eliot parecerían ilustrar gráficamente la situación:

Así acaba nuestro mundo.
No con un grito, sino con un gemido.

El conocimiento actual de la física fundamental nos permite prever la historia de la materia a lo largo de inmensos intervalos de tiempo. Sin embargo, para referirnos a estos tiempos remotos resulta necesario servirse de números superiores en órdenes de magnitud mayores a los que hasta ahora hemos utilizado. El tiempo de vida de una estrella como el Sol es de unos 10^{10} (10.000 millones) años. Empero, las estrellas más débiles y de combustión más lenta tienen una esperanza de vida que puede llegar a ser 10.000 veces mayor. Así, habrán de transcurrir unos 10^{14} (100 billones) años hasta que toda la actividad estelar quede extinguida y ya no queden estrellas en el universo. En ese momento, las galaxias estarán formadas tan sólo por materia fría y oscura.

Transcurrido otro trillón (10^{18}) de años, las galaxias sufrirán un proceso de implosión, pues la teoría de la relatividad predice que en cualquier sistema de cuerpos orbitales la energía ha de radiarse en forma de ondas gravitatorias. Cierta proporción de la materia de las galaxias podría ser absorbida hacia el centro de agujeros negros cada vez más grandes.

Si, tal y como opinan algunos físicos, los protones no son estables sino que degeneran tras una larguísima vida, la materia se descompondrá en un futuro remoto. Los protones comenzarán a desvanecerse transcurridos no menos de 10^{32} años a partir de ahora, y se convertirán en partículas más ligeras tales como positrones o muones. Todos los átomos del universo que no hayan sido absorbidos por los agujeros negros desaparecerán para verse reemplazados por partículas más ligeras y de radiación.

Si es cierto que los protones degeneran de este modo, el final del universo se verá señalado por la evaporación de los agujeros negros (pág. 65). Ello tendrá lugar a lo largo de una gran cantidad de escalas de tiempo, pues la velocidad de desaparición de cada agujero negro dependerá de su masa. Un agujero negro que contenga 10 veces la masa del Sol se evaporaría dentro de 10^{68} años, mientras que otro 10 veces mayor tardaría 1.000 veces más en hacerlo, esto es, dentro de 10^{71} años. Los agujeros negros gigantes aún tardarían más, y podrían perdurar durante 10^{90} ó 10^{100} años.

No obstante, si los protones no degeneran nos hallaríamos ante una situación distinta. Transcurridos 10^{1500} años, las enanas blancas se convertirán en estrellas de neutrones, y mucho tiempo después todas las estrellas de neutrones formarán una amalgama de agujeros negros. El fin llegará cuando éstos terminen por evaporarse, dejando tras de sí un universo informe de radiación y partículas.

A la mayor parte de las personas, esta desaparición gradual de la materia les resultará una posibilidad menos atractiva que la alternativa del universo cerrado, en el que la gravedad tendría la última palabra, lo que produciría un fin violento. Dado que continuamente se realizan nuevos descubrimientos de masa oculta en el universo, esta alternativa no deja de resultar posible. En este caso, el escenario resulta muy diferente, y la escala de tiempo es mucho menor.

El momento preciso en el que la expansión cesara para convertirse en implosión dependería del valor exacto de la constante de Hubble. Una vez que la contracción hubiera tenido lugar durante unos cuantos miles de millones de años los cúmulos de galaxias comenzarían a mezclarse aproximadamente mil millones de años antes del *Big Crunch*. En ese momento, pasarían cientos de millones de años hasta que las galaxias comenzaran a unirse entre sí.

Esta fusión crearía una única super-hipergalaxia que ejercería una inmensa atracción gravitatoria sobre las estrellas que la formaran. Transcurrido otro millón de años, las estrellas se aproximarían entre sí hasta tal punto que el cielo nocturno sería tan brillante como el Sol. La temperatura del espacio se elevaría hasta superar la de las estrellas, que estallarían. En esta materia caliente y densa florecerían rápidamente los agujeros negros, y 100.000 años antes del *Big Crunch* comenzarían a formarse a una velocidad catastrófica, absorbiendo todo lo que les rodeara.

El fin de los tiempos podría llegar tras la conversión final del universo en una singularidad, esto es, un único punto del espacio y del tiempo en el que la densidad y la temperatura alcanzan un grado infinito y dejan de regir las leyes físicas. Pero podría producirse una secuela en la que se recrearan las condiciones del *Big Bang*, se unieran de nuevo las cuatro fuerzas fundamentales y el universo retornara a su estado original, dispuesto a expandirse de nuevo.

Si ese nuevo *Big Bang* tuviera lugar, el universo gozaría de una nueva etapa de vida, expandiéndose hasta que la gravedad se impusiera y causara otra contracción. El ciclo vital de expansión y contracción se repetiría continuamente en un universo recuperable que duraría eternamente.



Si el universo comenzara a contraerse *de nuevo en algún futuro remoto, su evolución podría asemejarse a una película de su historia vista en sentido inverso. Cuando sólo faltaran unos pocos miles de millones de años para el* Big Crunch, *las galaxias se hallarían más próximas entre sí de lo que se encuentran ahora, el cielo sería más brillante y la temperatura del universo se habría elevado.*



Llegará un momento en que las galaxias se vean separadas *por distancias comparables a sus diámetros. Ello ocasionaría una interacción entre las mismas, que se fusionarán con mayor frecuencia de lo que lo hacen ahora. El creciente número de agujeros negros en el interior de las galaxias diferenciará la imagen de este proceso de contracción de la de la anterior expansión.*

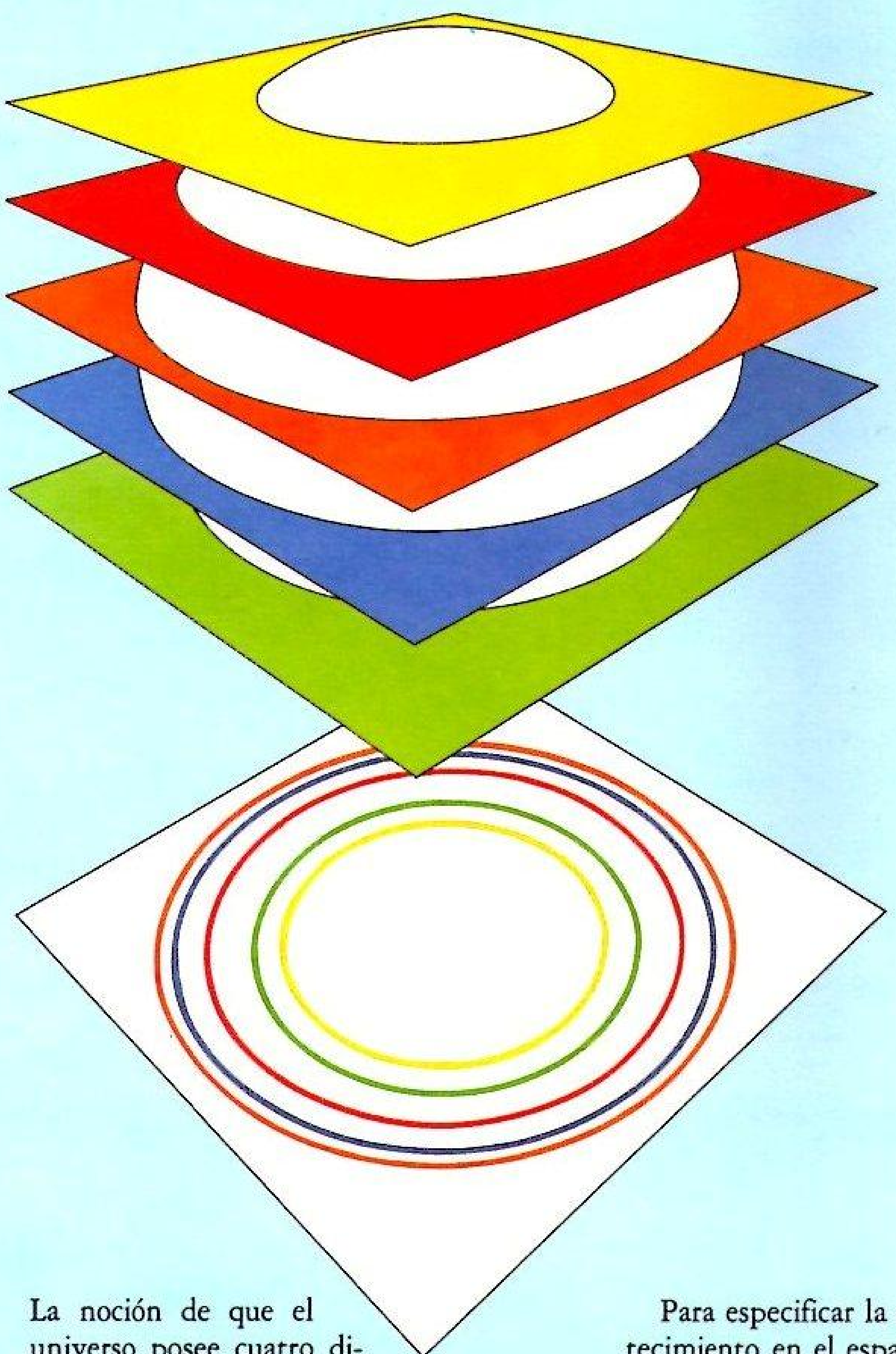
Cuando acaso sólo falten unos pocos siglos *para la implosión final, la temperatura de la radiación ambiental que inunda el espacio se elevará hasta desintegrar las estrellas. Al mismo tiempo, los agujeros negros comenzarán a absorber materia y radiación.*

En la última década de la contracción, *los agujeros negros se fusionarán hasta que todo el universo sea tragado por un único agujero negro de tamaño colosal. Con ello podría producirse el fin del universo y del tiempo.*

El universo podría razonablemente renacer *después de la imposión en otro Big Bang. De suceder así, el universo repetiría el mismo ciclo de expansión y contracción una y otra vez. Según algunas teorías, cada ciclo sería algo mayor que el anterior.*

DIMENSIONES OCULTAS

• *La teoría de supercuerdas de partículas fundamentales*



***Si el mundo bidimensional de Planilandia** hiciera intersecciones de un objeto tridimensional (como, por ejemplo, una esfera), sus habitantes lo percibirían tan sólo como una serie de secciones bidimensionales. Para ellos, la esfera tendría el aspecto de un disco que surgiría de la nada, se expandiría y luego se contraería (ver diagrama inferior). Las criaturas como nosotros tendríamos dificultades semejantes a la hora de percibir objetos cuatridimensionales.*

La noción de que el universo posee cuatro dimensiones —tres de espacio y una de tiempo— se ha convertido en algo familiar para nosotros desde Einstein. Si bien su trabajo nos proporciona una nueva forma de contemplar dichas dimensiones, la idea parece encajar con nuestra experiencia. Los cosmólogos modernos sugieren que el universo podría poseer aún más dimensiones y, de hecho, se estudia seriamente la posibilidad de que existan espacios-tiempos de 10, 11 o más dimensiones.

El espacio ordinario se describe como tridimensional porque tan sólo se necesitan tres números o coordenadas para especificar cualquier posición que se ocupe en el mismo. La situación de una nave voladora, por ejemplo, se define especificando su altitud, longitud y latitud.

Para especificar la situación de un acontecimiento en el espacio-tiempo es preciso recurrir a un nuevo dato que representará el momento en que ha tenido lugar. A ello se debe que el espacio-tiempo sea descrito como cuatridimensional. Los matemáticos pueden extender este concepto a nuevas dimensiones independientemente de que éstas sean consideradas o no reales.

El mejor modo de concebir la existencia de otras dimensiones consiste en imaginarnos el caso de Planilandia, un lugar imaginario habitado por seres que viven sobre uns superficie plana y tan sólo conocen dos dimensiones.

Imaginemos que un habitante de Planilandia está sentado en la playa contemplando el mar. En ese momento, sucede algo inesperado: una pelota atraviesa el mundo bidimensional. El habitante de Planilandia no verá una pelota, pues no conoce el concepto de la esfera.

El habitante de Planilandia comenzará por ver un punto en el mar, allí donde la pelota entra en contacto con él. A medida que la pelota atraviese el mar, irá desplazando una zona circular del mismo. El observador verá, pues, el borde de un círculo que crece sobre el mar. Cuando la pelota se encuentre exactamente a mitad de camino, el círculo habrá alcanzado su tamaño máximo. A continuación, comenzará a menguar hasta convertirse en un punto que desaparecerá sin dejar rastro.

El habitante de Planilandia ha observado algo muy extraño: la aparición de un objeto que se hincha, se encoge y desaparece. Sin embargo, para aquellas criaturas tridimensionales dotadas de una imaginación menos restringida que la suya, se trata de un suceso perfectamente explicable. Un matemático de Planilandia podría concebir la forma tridimensional de la pelota por medio del razonamiento abstracto.

¿Acaso nosotros, las criaturas tridimensionales, contamos con una percepción igualmente restringida? Existen buenos motivos para pensar que sí. Hace casi 70 años, el físico polaco Theodor Kaluza intentó extender la relatividad de tal modo que la perspectiva geométrica de Einstein abarcara no sólo la gravitación, sino también el electromagnetismo, y lo consiguió sin necesidad de alterar las ecuaciones de Maxwell (págs. 14-15).

Demostró que si bien el electromagnetismo y la gravedad constituirían elementos separados en un mundo cuatridimensional formado por el tiempo y las tres dimensiones del espacio, en uno de cinco dimensiones formado por el tiempo y cuatro dimensiones espaciales serían dos aspectos distintos de un único elemento. En una palabra, logró unificar la gravedad y el electromagnetismo añadiendo una nueva dimensión espacial.

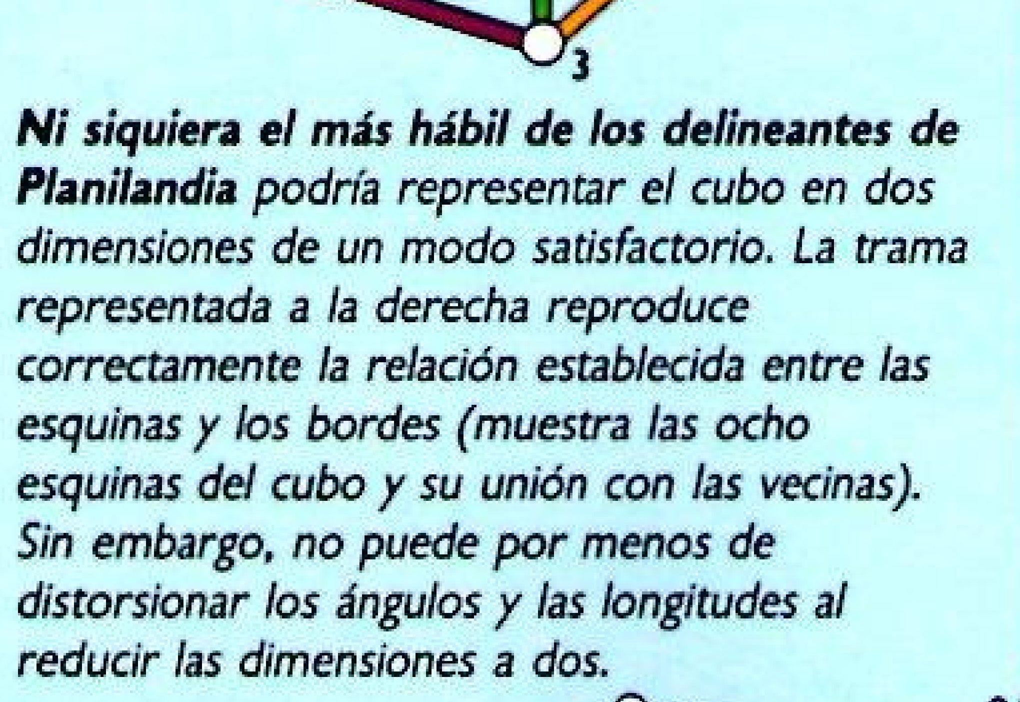
Cinco años después de que Kaluza anunciara su teoría, el físico sueco Oscar Klein propuso que la dimensión extra se encuentra «arrollada» de tal modo que no podemos percibirla. En geometría, el punto es un concepto desprovisto de longitud o anchura. Supongamos que sustituimos cada punto de Planilandia por un círculo diminuto situado en ángulo recto con el plano

del mundo bidimensional. El círculo representaría la tercera dimensión, pero estaría tan arrollado que resultaría imperceptible para sus habitantes. De este modo cada punto de nuestro espacio-tiempo cuatridimensional debería ser sustituido por un bucle que representara una distancia diminuta en la cuarta dimensión espacial.

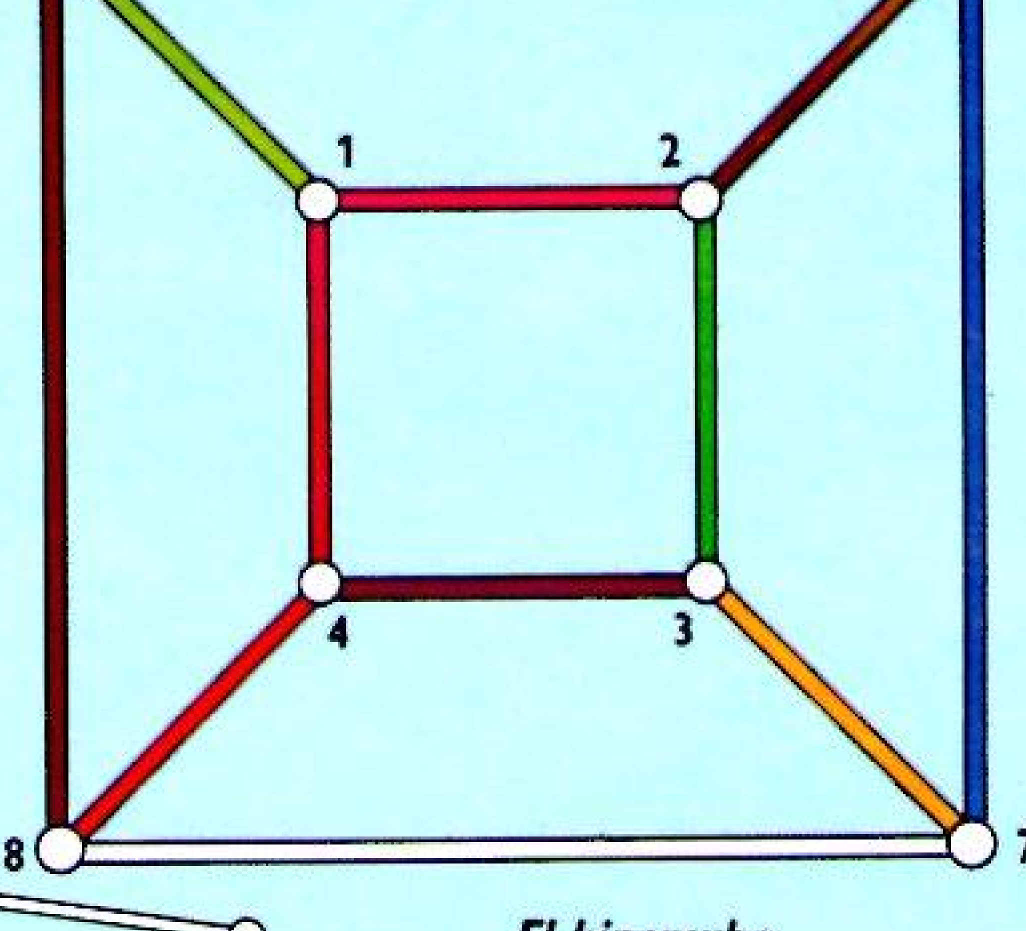
El concepto de una cuarta dimensión no es difícil de imaginar si se realiza paso a paso, del mismo modo que el habitante de Planilandia descubrió la esfera a lo largo de diferentes etapas. Matemáticamente, resulta sencillo, y parece posible precisar las propiedades que poseería. Sin embargo, la imaginación falla cuando intentamos imaginarnos 5, 10 u 11 dimensiones.

Un poderoso motivo para considerar la posibilidad de que existan dimensiones adicionales en el espacio es el desarrollo de la nueva teoría de supercuerdas de las partículas fundamentales. A finales de los años sesenta, el físico italiano Gabriele Veneziano sugirió un nuevo modo de explicar el comportamiento de las partículas subatómicas. Expresó sus resultados por medio de ecuaciones que resultaron ser idénticas a la vibración de una cadena. Parecía, por tanto, que debían de existir entes similares a cadenas elásticas que unieran los núcleos.

Una vez desarrollado el concepto de los quarks, la teoría de Veneziano hubo de ser



La naturaleza tridimensional de un cubo *(izquierda) aparece señalada por el hecho de que desde cada esquina surgen tres bordes situados en ángulo recto.*



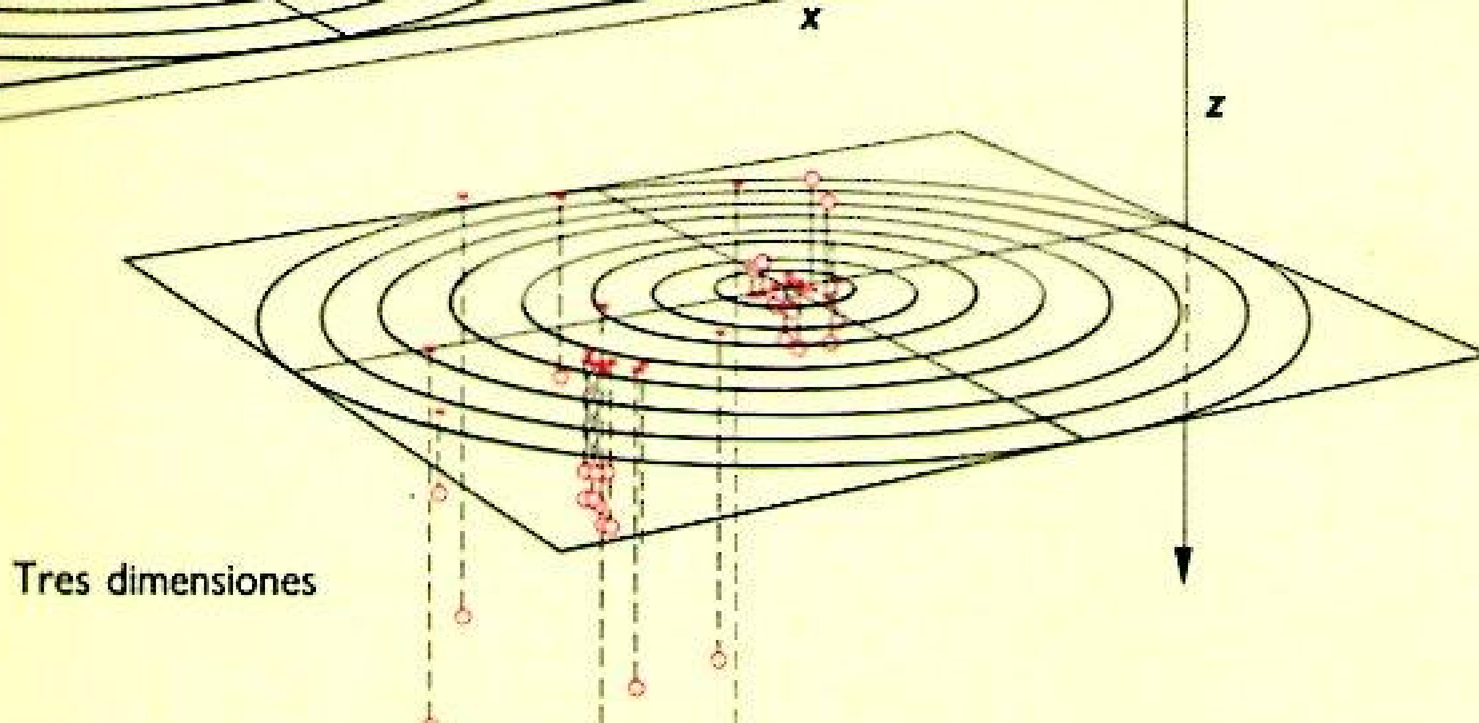
Ni siquiera el más hábil de los delineantes de Planilandia *podría representar el cubo en dos dimensiones de un modo satisfactorio. La trama representada a la derecha reproduce correctamente la relación establecida entre las esquinas y los bordes (muestra las ocho esquinas del cubo y su unión con las vecinas). Sin embargo, no puede por menos de distorsionar los ángulos y las longitudes al reducir las dimensiones a dos.*

El hipercubo cuatridimensional *podría representarse en tres dimensiones (izquierda) por medio de una estructura en la que cada esquina se hallara conectada con la correspondiente de su cubo vecino. En el hipercubo real todos los bordes se hallarían en ángulo recto, mientras que en la estructura de representación tal diseño resulta imposible.*

El significado de las coordenadas

Un ejemplo de espacio bidimensional sería el descrito por un mapa. Podemos especificar cualquiera de sus puntos por medio de dos coordenadas. La numeración se inicia en un punto dado —digamos, por ejemplo, nuestra propia posición en el mapa— y se determinan dos distancias definidas como *x* kilómetros al este e *y* kilómetros al norte. (Los valores negativos de *x* e *y* señalarían respectivamente posiciones situadas al oeste o al sur.)

Supongamos ahora que se precisa establecer la información referente a la altitud o a la profundidad. Necesitaremos para ello de una tercera dimensión y de una tercera coordenada *z* que mediremos a partir del nivel del mar (utilizando valores negativos para indicar las distancias inferiores a este último).



Dos dimensiones

En un mapa bidimensional *(arriba), cada posición especificase por dos coordenadas, x e y.* El mapa puede representar objetos planos, pero no tridimensionales como el Grupo Local de galaxias.

Al añadir la tercera dimensión, *representada por la coordenada z, descubrimos las posiciones reales de las galaxias.*

archivada por las dificultades de adaptación que presentaba. No obstante, siguió utilizándose para describir los gravitones —las partículas mensajeras de la gravedad—, por lo que acaso la teoría de supercuerdas sea realmente una teoría de la gravedad.

A comienzos de los setenta, surgieron nuevas teorías. Una de ellas explicaba de qué modo los quarks se mantenían unidos por partículas mensajeras llamadas gluones. En dichas teorías, la simetría (pág. 28) desempeñaba un papel fundamental. Uno de los tipos de simetría propuestos se llamó supersimetría, y unía las dos grandes familias de partículas: los bosones (partículas dotadas de spins iguales a un número entero, como los fotones) y los fermiones (partículas dotadas de un spin fraccionario, como los protones y los electrones).

No obstante, la supersimetría implica muchas más dimensiones que las cuatro que intervienen en el espacio-tiempo einsteniano. En una de las teorías, denominada de la supergravedad, intervienen 11 dimensiones, de las que 10 son de espacio y una de tiempo. Otra teoría es un desarrollo de la teoría de cuerdas en la que interviene la supersimetría. Se denomina teoría de las supercuerdas, y es el resultado de la labor del físico norteamericano John Schwarz y de su colega británico Michael Green.

En dicha teoría, los matemáticos muestran que las partículas pueden ser descritas como vibraciones de cuerdas abiertas o de cuerdas cerradas en forma de bucle. El tamaño de las cuerdas abiertas es más o menos equivalente al de la longitud de Planck, esto es, una distancia de tan sólo 10^{-32} milímetros o una cien mil millonésima parte de la milmillonésima parte del núcleo atómico. Las vibraciones de las cuerdas abiertas dan lugar a partículas de spin 1 desprovistas de masa, tales como los fotones. Asimismo, las cuerdas abiertas pueden cerrarse para formar bucles, lo que da lugar a otra clase de partículas, entre las que se incluyen los gravitones spin2 desprovistos de masa, estos últimos aún por descubrir.

La teoría heterótica o «mestiza» de las supercadenas combina las cuerdas abiertas y los bucles cerrados. Las vibraciones que se desplazan en torno a un bucle en el sentido de las manecillas del reloj poseen 10 dimensiones, mientras que las que lo hacen en sentido contrario tienen 26.

Según la relatividad, las trayectorias de las partículas a través del espacio-tiempo se denominan líneas del universo (págs. 62-65). En la teoría de las supercuerdas, las cuerdas y los bucles delimitan una superficie bidimensional en el espacio-tiempo conocida como plano universal, la cual resultaría análoga a la película que forma una pompa de jabón. Las interacciones entre las cuerdas y la vibración del plano universal explicarían el comportamiento cuántico de las partículas subatómicas, así como el de las partículas mensajeras.

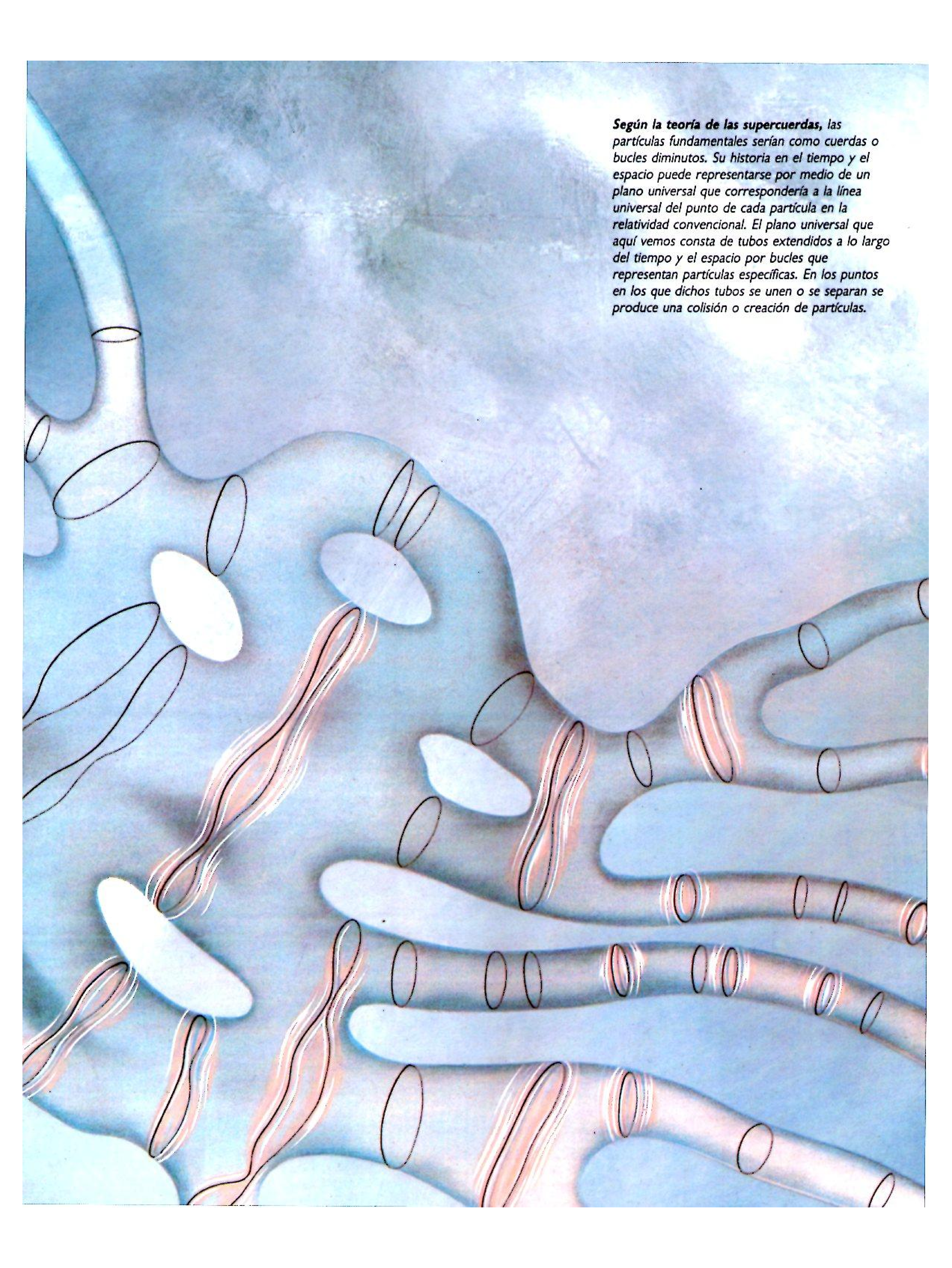
Dado que la teoría de las supercuerdas exige la existencia de diez dimensiones de espacio-tiempo y que en el espacio-tiempo de Einstein tan sólo intervienen cuatro, es preciso «arrollar» las seis restantes del modo sugerido por Klein. Es posible que en los primeros instantes del *Big Bang* todas las dimensiones se encontraran igualmente «arrolladas» y poseyeran idéntica importancia. Por algún motivo, tan sólo tres dimensiones espaciales se han desenrollado desde entonces hasta formar el colosal tamaño del presente universo.

Las dimensiones arrolladas poseen una curvatura extraordinariamente pronunciada, que es preciso medir limitándose al tamaño de las cadenas, 10^{-32} milímetros. Si una partícula pudiera viajar a la velocidad de la luz a través de una de las dimensiones adicionales y regresar al punto de partida, tan sólo se hallaría ausente durante un período inferior a los 10^{-32} segundos del tiempo de Planck. Así, su ausencia jamás podría establecerse a escala macroscópica.

Adicionalmente, y según el principio de incertidumbre de Heisenberg (pág. 25), tales distancias infinitesimales podrían estudiarse tan sólo por medio de dosis extraordinariamente altas de energía. De hecho, la exploración de distancias equivalentes a la longitud de Planck exigiría dotar a las partículas de una energía de magnitud desconocida desde el *Big Bang*.

Una interesante consecuencia de la teoría de las supercuerdas es que podría existir un tipo de materia no previsto hasta ahora y detectable tan sólo por sus efectos gravitatorios. Se denomina materia fantasma, y podría contribuir a formar la materia ausente que hoy creemos que podría existir y que, acaso, podría llegar a convertir la expansión del universo en una contracción.

La teoría de las supercuerdas espera su confirmación. Todavía es demasiado pronto para llegar a conclusiones definitivas acerca de ella. No obstante, no deja de existir la posibilidad de que represente un paso más en dirección a la TOE *(Theory of Everything)*, o Teoría Universal.



Según la teoría de las supercuerdas, *las partículas fundamentales serían como cuerdas o bucles diminutos. Su historia en el tiempo y el espacio puede representarse por medio de un plano universal que correspondería a la línea universal del punto de cada partícula en la relatividad convencional. El plano universal que aquí vemos consta de tubos extendidos a lo largo del tiempo y el espacio por bucles que representan partículas específicas. En los puntos en los que dichos tubos se unen o se separan se produce una colisión o creación de partículas.*

EL ESPACIO CUÁNTICO

El tejido del mundo microscópico

Los intentos de la ciencia actual por remontarse al comienzo del *Big Bang* propiamente dicho —esto es, el instante anterior a los 10^{-43} segundos del tiempo de Planck— se enfrentan a un grave obstáculo. Las leyes físicas conocidas no resultan aplicables a las condiciones extremas del espacio y tiempo que debieron regir entonces. Así, los teóricos se esfuerzan por extender dichas leyes o desarrollar otras nuevas, lo que les permitiría realizar nuevos descubrimientos.

Otro enfoque distinto pasaría por el estudio de la radiación gravitatoria. La relatividad predice la existencia de ondas gravitatorias, y la teoría cuántica prevé que, al igual que cualquier otra radiación, ésta debería producirse en forma de partículas bajo determinadas circunstancias. Estas partículas mensajeras imaginarias se llaman gravitones. La detección experimental de las ondas gravitatorias de gravitones constituiría un paso fundamental para la unificación de la gravedad con el resto de las fuerzas fundamentales.

Desde la década de los sesenta, se han realizado diversos intentos por observar dichas ondas. Los experimentos más célebres han sido los efectuados por Joseph Weber, quien se sirvió de una gruesa barra de aluminio puro de 4 toneladas de peso. Semejante bloque de metal resultaría demasiado para responder a las alteraciones locales más corrientes —tales como las vibraciones producidas por el tráfico automovilístico o los temblores sísmicos—, pero sí se vería oprimido y expandido por el paso de ondas gravitatorias que lo harían «resonar» como una campana, aun teniendo en cuenta que la distorsión producida sería incluso inferior al tamaño de un núcleo atómico.

Weber equipó la barra con un sistema de detectores extremadamente sensibles y obtuvo en un primer momento lo que parecía ser un resultado positivo, si bien luego hubo de descartarlo como una falsa alarma. Desde entonces, el instrumento no ha registrado onda gravitatoria alguna.

Estos físicos han ideado constantemente nuevos métodos. En uno de ellos, el detector consta de dos haces emitidos por un láser. Cada haz se dirige sobre una tubería de acero inoxidable de tres km de longitud en cuyo extremo existe un espejo que lo refleja. Este espejo está instalado sobre un enorme bloque de metal destinado a asegurar su estabilidad. El efecto se ve aumentado reflejando los haces 50 veces en una y otra dirección, lo que les proporciona una longitud equivalente a 150 km. Llegado un cierto punto, los haces se unen y sus ondas se interfieren mutuamente.

Cualquier onda gravitatoria habría de estirar y oprimir el espacio a su paso, modificando las distancias recorridas por los haces de luz. Ello modificaría momentáneamente el ritmo de interferencias, representado por líneas brillantes y oscuras.

Tales instrumentos pueden ser instalados en Glasgow (Escocia) y en Garching (Alemania). Si una interferencia local afecta a uno de ellos, cabe esperar que el otro se mantenga estable, mientras que una onda gravitatoria debería afectar a todos los instrumentos capaces de detectarla, los cuales registrarían su paso en instantes distintos y, con ello, proporcionarían información acerca de su procedencia.

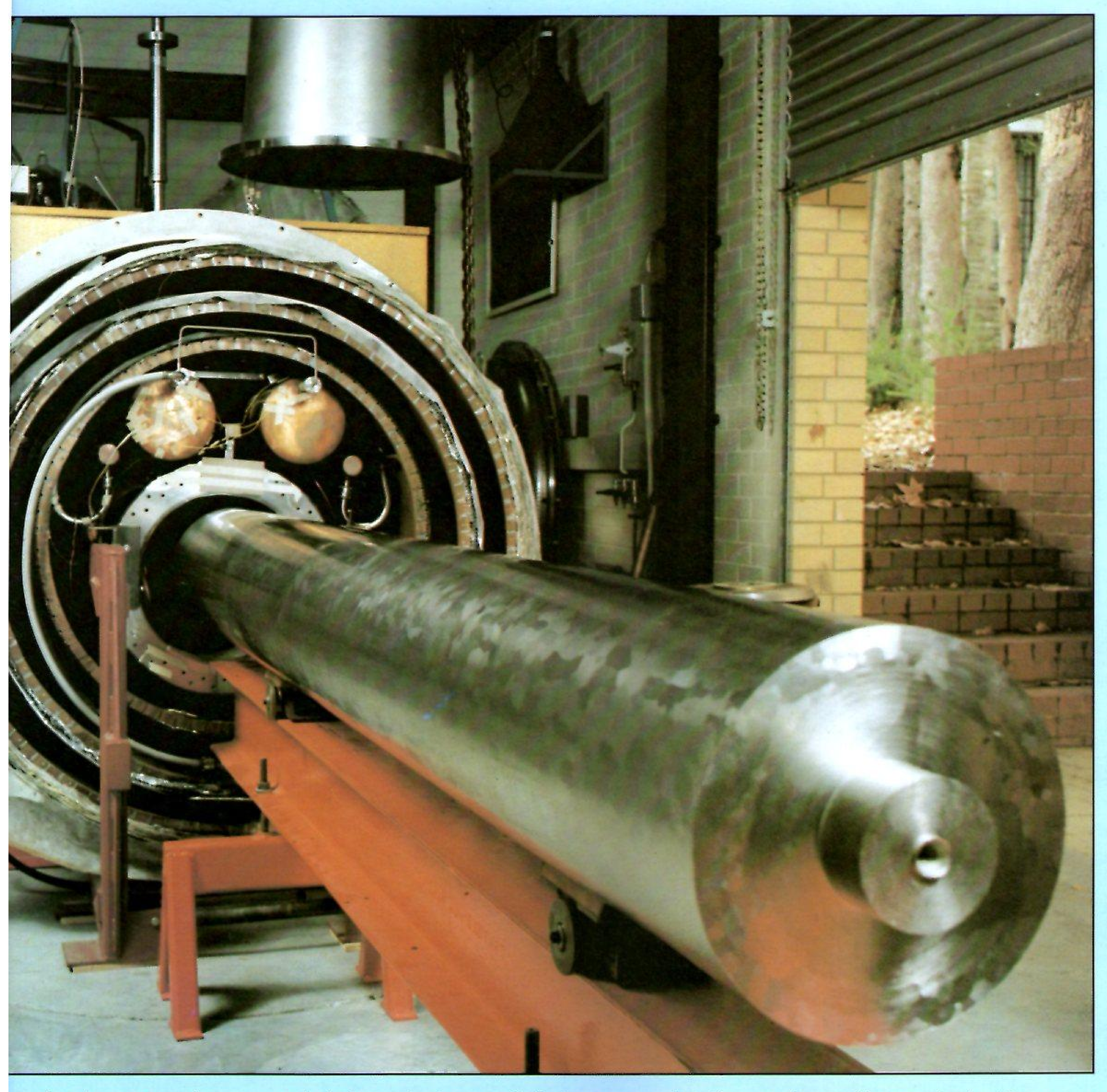
Ya se han realizado observaciones significativas sobre la existencia de ondas gravitatorias. El púlsar PSR 1913+16 forma parte de un sistema binario, esto es, gira en torno a otra estrella con un ciclo de $7^3/_4$ horas. Se ha calculado que debe perder energía a través de la emisión de ondas gravitatorias al aproximarse ambas estrellas. En 1974, se detectó un alargamiento de 7,5 millonésimas de segundo anuales en el período orbital del púlsar, lo que hace probable que se trate de una pérdida de energía debida a la radiación gravitatoria.

De existir los gravitones o partículas gravitatorias mensajeras, deberán hallarse sujetos a la misma incertidumbre del resto de las partículas (pág. 25). El lugar y momento de su absorción o emisión no se conoce con precisión. Dado que la gravedad distorsiona el espacio, los gravitones obligarán al espacio a curvarse en torno a ellos. La incertidumbre cuántica hará que dicha curvatura fluctúe, esto es, el espacio-tiempo puede imaginarse como una superficie ondulante debido a la presencia de los gravitones. Sin embargo, se trataría de una ondulación imperceptible, pues la gravedad resulta sumamente débil comparada con las fuerzas electromagnética y nucleares. Incluso un cuerpo tan masivo como el Sol logra desviar tan sólo ligeramente la luz que pasa junto a él.

El principio de incertidumbre implica que las partículas pueden adquirir energía durante una fracción infinitesimal de segundo. La cantidad y duración de esta apropiación dependerá de la fuerza que transporten las partículas. En el caso de los gravitones, que transportan una fuerza gravitatoria sumamente débil, la apropiación



Detector de ondas gravitatorias *diseñado por Joseph Weber, pionero en este campo de investigación. Instalado en la Universidad de Australia Occidental, consta de una barra de niobio que habría de «resonar» durante largo rato como una campana cada vez que se viera atravesada por una onda gravitatoria. Si bien se trataría de vibraciones más pequeñas que el núcleo de un átomo, podrían distinguirse del entorno formado por las vibraciones mecánicas y térmicas normales. Se afirma que este tipo de antenas en barra ha detectado las ondas gravitatorias procedentes de la supernova observada en febrero de 1987 en la Gran Nube de Magallanes.*



durará muy poco tiempo: no más de los 10^{-43} segundos del tiempo de Planck.

Durante ese brevísimo período, aquellas partículas que viajen incluso a la velocidad de la luz apenas podrán recorrer los 10^{-32} milímetros de la longitud de Planck. Así, las ondulaciones que hallemos en el espacio-tiempo se hallarán en una escala inferior a ésta. Dichas ondulaciones hacen que las teorías actuales resulten inaplicables a los primeros instantes del *Big Bang*, cuando el universo poseía aún un tamaño microscópico.

Todo ello parece indicar que una vez que resulte posible extender la física a este terreno hasta ahora prohibido, descubriremos que el espacio ha dejado de ser continuo para convertirse en cuantizado o dividido en unidades elementales. Quizá descubramos que es como una esponja de dimensiones ultramicroscópicas.

DUDAS SOBRE EL *BIG BANG*

• *Desafíos a la ortodoxia*

Los problemas con los que topamos al investigar los primeros instantes del universo carecerían de importancia si pudiéramos abandonar la teoría del *Big Bang*. Si bien ésta parece encajar admirablemente con la física nuclear y con el universo tal y como se observa desde la Tierra, algunos científicos aún ponen su validez en tela de juicio.

A finales de los años cuarenta, el astrofísico británico Fred Hoyle y sus colaboradores Hermann Bondi y Thomas Gold propusieron su teoría del universo estacionario. Sugerían que el universo muestra siempre el mismo aspecto, no sólo en cualquier momento sino desde cualquier punto de vista. Así, aunque las galaxias nacen, evolucionan y se separan entre sí, se ven continuamente reemplazadas por materia de reciente creación en forma de hidrógeno gaseoso que a su vez termina por transformarse en nuevas galaxias y estrellas. Se trataría de un universo sin principio ni fin.

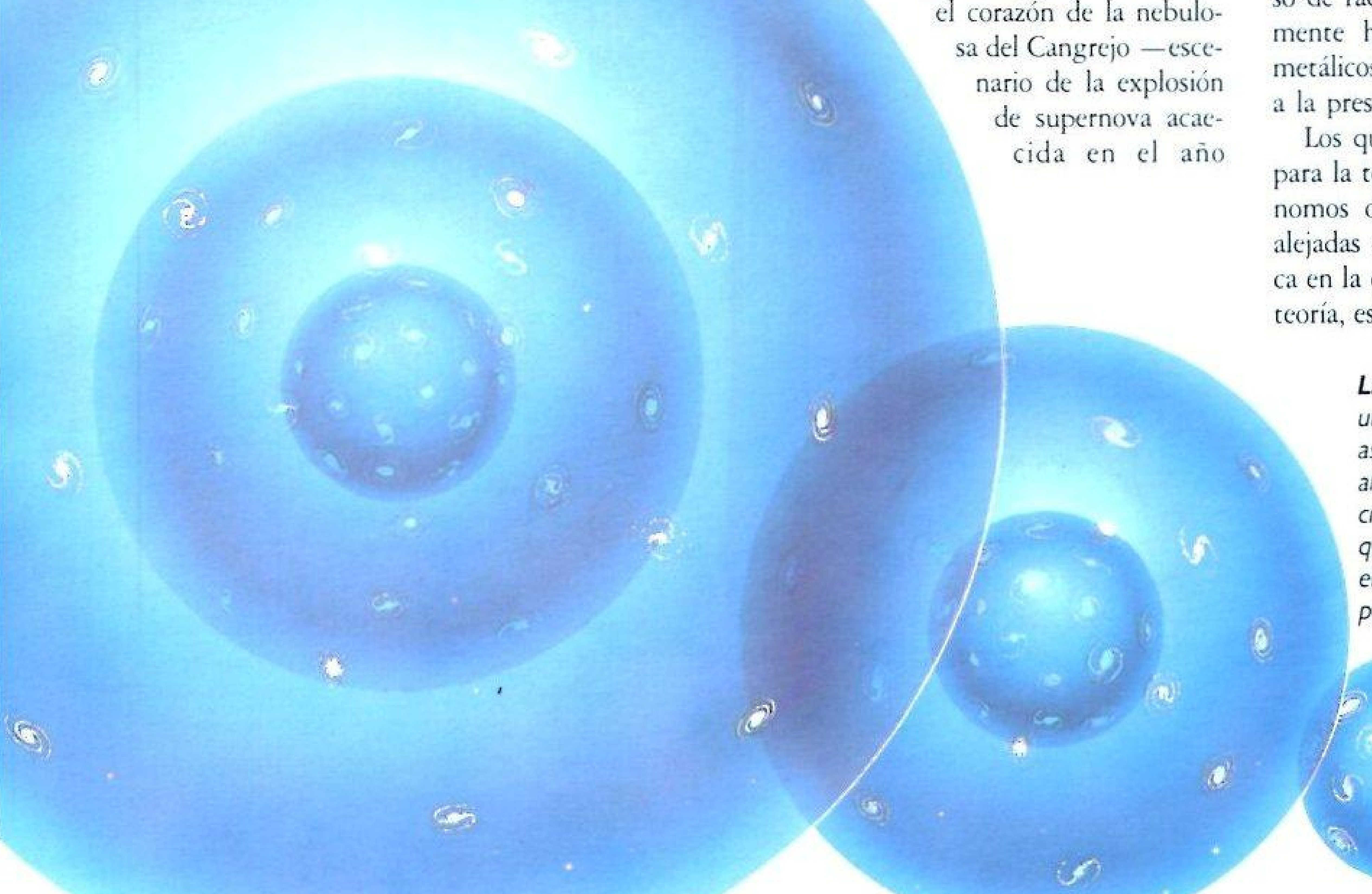
Tras ver despreciada su teoría, Hoyle ha vuelto a proponerla como una alternativa cosmológica seria. Afirma que con ella podría explicarse la abundancia de deuterio, hidrógeno y helio tan claramente como con la teoría del *Big Bang*.

Uno de los argumentos más poderosos en favor de esta última es la presencia de las microondas, consideradas como un vestigio del *Big Bang* o, en otras palabras, los fríos restos de la ardiente bola de fuego que dio lugar al nacimiento del universo. Hoyle sugiere una nueva explicación: que la radiación de fondo se deba a acontecimientos recientes, tales como las supernovas. Los astrónomos se muestran de acuerdo con respecto al hecho de que los átomos más pesados del universo —especialmente el hierro— se forman en el transcurso de dichos acontecimientos. En la nueva teoría de Hoyle, los átomos de hierro llegarían a formar largas y delgadas «vibrisas».

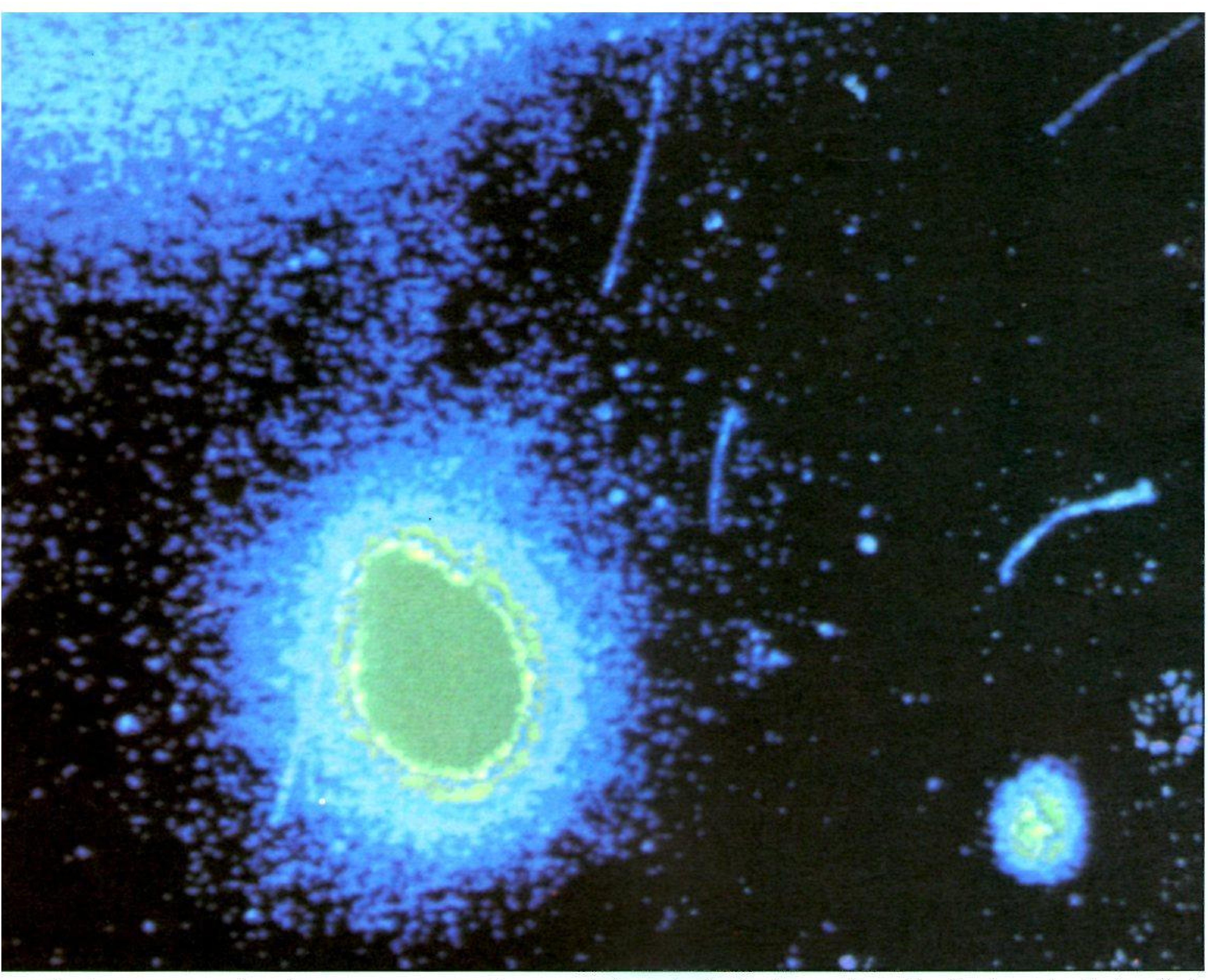
Si los vapores de los metales son enfriados lentamente, la mayoría se cristaliza en dicha forma. Adopta un grosor de dos millonésimas de milímetro y una longitud no superior a 1 milímetro. Hoyle aduce que esta clase de «vibrisas» de hierro flotarían en el espacio interestelar absorbiendo ondas de radio infrarrojas y de onda corta para luego reemitirlas con el espectro de longitudes de onda observadas en la radiación de fondo. Las observaciones realizadas del púlsar situado en el corazón de la nebulosa del Cangrejo —escenario de la explosión de supernova acaecida en el año 1054 de nuestra era— muestran un descenso de radiación en las bandas que supuestamente habrían absorbido estos filamentos metálicos. Según Hoyle, ello podría deberse a la presencia de estas agujas de hierro.

Los quasars constituyen un inconveniente para la teoría estacionaria. Cuando los astrónomos observan objetos situados en zonas alejadas del universo, se remontan a la época en la que la luz partió de ellos. Según esta teoría, estas regiones distantes deberían mos-

El quasar Markarian 205, *coloreado en verde en la imagen, parece hallarse físicamente relacionado con la galaxia NGC 4319 que aparece sobre él (obsérvense los tenues indicios de la existencia de un puente gaseoso entre ambos). No obstante, el espectro del* Markarian 205 *muestra un corrimiento hacia el rojo 10 veces mayor que el de la galaxia, lo que indicaría una distancia proporcionalmente mayor. Quienes se oponen a la teoría del* Big Bang *sugieren que en tales casos el objeto activo ha sido despedido a gran velocidad de la galaxia asociada, lo que explicaría su corrimiento hacia el rojo.*



La teoría estacionaria *sugiere que el universo posee siempre el mismo aspecto. A medida que las galaxias se alejan unas de otras, se produce una creación continua de nueva materia, lo que impide que el universo se disipe con el paso del tiempo. El diagrama muestra parte del universo en expansión a medida que en su interior se forma materia nueva que mantiene su densidad constante.*



trar el mismo aspecto que las más cercanas. Sin embargo, los quasars son más numerosos en distancias extremas («cosmológicas»), es decir, en épocas más remotas.

Una línea de ataque sobre este problema se basaría en la propia naturaleza de los quasars. Dado que la ley de Hubble nos dice que los objetos lejanos se alejan de nosotros a una velocidad proporcionalmente mayor según la distancia a la que se encuentran, los corrimientos hacia el rojo de los quasars son interpretados de la misma manera. Se presume que son tan descomunales debido a que los objetos que los emiten se encuentran a enorme distancia, opinión a la que se enfrenta Halton Arp.

Arp afirma que existen numerosas fotografías que muestran quasars cercanos a galaxias corrientes, e incluso aparentemente en contacto con ellas. No obstante, dichas galaxias no muestran grandes corrimientos hacia el rojo, lo lógico si se encontraran a la misma distancia que los quasars. Los quasars son bloques de materia despedidos por las galaxias a altas velocidades, lo que provocaría sus corrimientos hacia el rojo.

La mayor parte de los astrónomos opina que tales asociaciones aparentemente estrechas no son más que quasars situados prácticamente en la misma visual que una galaxia: dicho alineamiento sería fortuito. Quienes se oponen al *Big Bang* afirman que existen demasiados alineamientos como para que puedan deberse al azar.

También se dice que muchos de estos alineamientos son ilusiones ópticas causadas por un efecto gravitatorio de lente. Los pocos que apoyan la teoría de Arp aducen que en muchos casos los quasars se hallan demasiado alejados de las galaxias «vecinas» para obedecer a este motivo. Asimismo, opinan que existen quasars asociados con la mayor parte de las galaxias y que el efecto de lente se produciría en casos aislados.

En una palabra, opinan que los quasars que observamos se encuentran relativamente cerca de nosotros. De este modo, podrían hallarse distribuidos uniformemente a gran escala a lo largo del universo, tal y como plantea la teoría estacionaria.

La explicación alternativa de Arp elimina la necesidad de presuponer la existencia de una fuente masiva de energía procedente de los quasars. Si los quasars se hallan relativamente cerca de nosotros, su brillo no indicaría la emisión de cantidades prodigiosas de energía, por lo que no exigirían las condiciones para la formación de galaxias inherentes a la teoría del *Big Bang*.

No obstante, las teorías de Arp no parecen explicar por qué los quasars sólo muestran corrimientos hacia el rojo. En ellos nunca se observan corrimientos hacia el azul y, sin embargo, si consistieran en material despedido por las galaxias, cabría esperar tanta cantidad de materia acercándose a la Tierra como alejándose de ella y, por tanto, igual cantidad de corrimientos hacia el rojo que de corrimientos hacia el azul.

Así, dadas las dificultades planteadas por la teoría de Arp y los éxitos obtenidos por la teoría del *Big Bang*, la mayoría de los astrónomos continúa convencida de la veracidad de la segunda.

EL PRINCIPIO ANTRÓPICO

¿Un universo diseñado para el ser humano?

Durante la mayor parte de la historia de la humanidad se consideraba la Tierra como el centro del universo. Tal concepto formaba parte de una perspectiva general compartida por todas las civilizaciones, cada una de las cuales se situaba a sí misma en el centro de todas las cosas. Para los antiguos egipcios, su país era el centro del mundo, y su universo tan largo y estrecho como el propio Egipto. Para los habitantes de la antigua Mesopotamia, cuyo territorio se extendía en forma más o menos circular, el firmamento estaba formado por una cúpula.

Con el advenimiento de la gran civilización de la antigua Grecia, se propusieron diversas cosmologías rivales. El concepto dominante del universo era el de una esfera, con la Tierra —también redonda— inmóvil en su centro. Esta perspectiva, unida a un análisis matemático de los movimientos planetarios basado en la Tierra como centro del universo, parecía tan incontrovertible que el concepto geocéntrico permaneció aceptado por todos los eruditos durante más de 1.800 años. Así, durante largo tiempo el ser humano fue educado en la creencia de que la Tierra era el centro del universo, y que el ser humano constituía su obra cumbre. El *Homo sapiens* era el cimiento de la creación, el señor absoluto de un universo antropocéntrico.

En 1543, Nicolás Copérnico propuso una nueva imagen matemática del universo en la que el centro se hallaba ocupado por el Sol. Posteriores estudios realizados por Kepler, Galileo y Newton sirvieron para respaldar esta teoría, por lo que a lo largo de poco más de un siglo, el ser humano se vio destronado de su posición original para pasar a ser el habitante de un planeta no demasiado grande situado en órbita en torno a lo que resultaría ser una estrella relativamente insignificante.

Esta perspectiva llegó en una época de revolución intelectual. Comenzaba a fundarse la ciencia moderna, que exigía que toda teoría se basara en pruebas experimentales respaldadas por un análisis matemático. La degradación de la humanidad a un lugar tan insignificante parecía encajar perfectamente con aquel universo mecanicista gobernado por leyes impersonales.

Durante el siglo XX, nuestros conceptos de las leyes físicas han sufrido una severa sacudida con la llegada de la teoría cuántica. Las partículas ya no se contemplan como cuerpos sólidos dotados de posiciones y movimientos determinados, sino que son descritas como ondas de probabilidad. Se ha puesto de manifiesto que el acto de observación de dichas partículas ejerce su propio efecto sobre las mismas. Así, ha llegado a descomponerse en diversas partes el universo mecanicista de siglos anteriores, al menos en lo que se refiere al mundo microscópico de las partículas subatómicas.

Bajo el universo de la física y astronomía

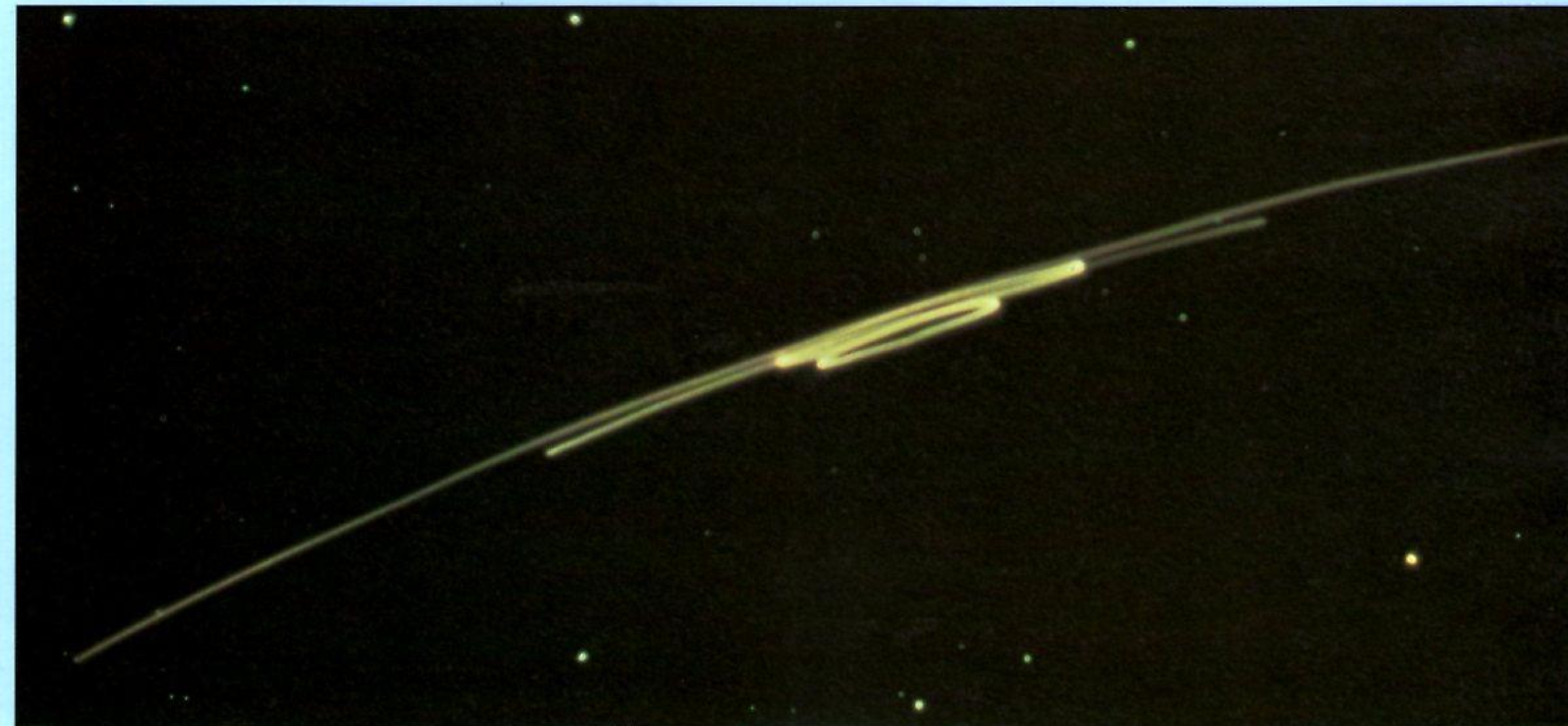


Nuestro lugar en el universo

Para los primeros astrónomos, resultaba natural imaginar un universo cuyo centro se hallara ocupado por nuestro punto de observación, la Tierra. También las autoridades religiosas creían que la humanidad, en tanto que creación de Dios, debía hallarse en el centro del mismo. El astrónomo griego Aristarco creía posible que los planetas giraran en órbita en torno al Sol.

Posteriormente, a principios del siglo XVI, el astrónomo polaco Nicolás Copérnico demostró que un sistema en el que el

Un planetario o modelo mecánico del sistema solar, *del siglo XVIII, que simboliza un concepto universal en el que la Tierra ya había sido destronada de su posición central.*



En ocasiones, Marte parece mostrar un movimiento retrógrado *al ser contemplado desde la Tierra: retrocede y avanza. Para Copérnico era poco probable que semejante desplazamiento fuese natural; el efecto debía obedecer al paso de la Tierra junto a Marte, dado que ambos planetas describían órbitas en torno al Sol.*

del siglo XX subyace un modelo relacionado con las cuatro fuerzas fundamentales y con ciertas cantidades asociadas a ellas. Estas cantidades básicas incluyen las masas de partículas tales como el protón y el electrón, sus cargas eléctricas, las fuerzas de gravitación y magnetismo y las fuerzas nucleares fuerte y débil. Incluyen asimismo la constante de Planck, que determina la escala de los efectos cuánticos, así como la llamada constante de estructura fina, que describe el comportamiento de un electrón sometido a la acción de un campo eléctrico.

Los valores numéricos de todas ellas dependen de las unidades que escojamos para medirlas y, por ello, no poseen significado intrínseco alguno; los números puros que no dependen de la elección de unidades pueden obtenerse considerando diversas combinaciones de estas cantidades. Los resultados incluyen las coincidencias elevadas. La fuerza eléctrica entre el protón y el electrón en un átomo de hidrógeno es 10^{39} veces tan potente como el campo gravitatorio que se extiende entre ellos. Esta enorme escala es prácticamente la misma que existe entre el tamaño del universo observable y el del electrón, situada en torno a 10^{40}. Adicionalmente, 10^{40} multiplicado por sí mismo equivale a 10^{80}, esto es, el orden de magnitud del número de átomos contenidos en el universo.

Tal y como ha señalado el científico británico Martin Rees, la expectativa de vida de una estrella guarda relación con el tiempo que tarda un fotón en viajar desde sus regiones centrales a la superficie. Ello se debe a que el tiempo de vida depende de la masa de la estrella, por lo que puede encontrarse una relación entre la atracción gravitatoria de la estrella y el tiempo que tarda el fotón en atravesar un átomo. Esta relación puede ser expresada por medio de un número puro que resulta ser 10^{39} independientemente del tamaño de la estrella.

Dada la inmensidad de estas cifras, cualquiera de ellas podría haber adoptado un amplio abanico de valores. El hecho de que sean tan cercanas entre sí a duras penas puede considerarse como una coincidencia. Sugieren la existencia de un orden básico del universo que aún se encuentra en sus primeras etapas de comprensión.

Existen otras clases de coincidencia entre las características del universo. Afectan a la «sintonización» relativa de las fuerzas fundamentales y resultan cruciales para nuestra existencia. Vivimos en un universo que se expande a una velocidad previamente determinada en el momento del *Big Bang*. Si la gravedad hubiera sido un poco más potente, no habría tardado en imponerse y en precipitar su contracción; de haber sido más débil, la expansión se habría transformado en un proceso de fuga en el que las estrellas y las galaxias no habrían tenido tiempo de formarse. De haberse pro-

centro se hallara ocupado por el Sol constituiría una explicación más simple y aceptable del movimiento relativo de los planetas. Hoy sabemos que dicho concepto es correcto, y que la Tierra no se encuentra en el centro de nuestro sistema planetario. Tampoco el sistema solar se encuentra próximo al centro de nuestra galaxia.

Sin embargo, la idea de que la Tierra posee una importancia especial va ganando cada día más adeptos. Algunos científicos actuales opinan que el universo ha sido diseñado para favorecer el desarrollo de seres vivos y la Tierra es el único mundo en el que esto ha sido posible.

ducido cualquiera de ambas situaciones, jamás habría existido una Tierra en la que pudiera desarrollarse la vida.

Una vez más, de haber sido distintas cualquiera del resto de las escalas y constantes de la naturaleza, el universo habría impedido nuestra existencia. Si las fuerzas débil y fuerte fueran ligeramente más poderosas en relación con el electromagnetismo, el hidrógeno no existiría en su forma ordinaria. Ello significaría que los elementos más pesados, tales como el carbono y el oxígeno, jamás habrían llegado a formarse, por lo que no existirían seres vivos.

Si la fuerza nuclear débil poseyera una fuerza distinta no se producirían explosiones de supernovas. Así, se impediría la existencia de fuentes de elementos químicos pesados, pues por medio de dichas explosiones se diseminan los elementos pesados en el espacio interestelar para ser absorbidos por los sistemas planetarios.

La fuerza de la gravedad resulta crucial para la existencia de vida en el universo. Si fuera más débil, no podría oprimir la materia de una estrella del tamaño del Sol lo bastante para desencadenar en ella reacciones termonucleares. Sólo las estrellas de mayor tamaño brillarían como resultado de procesos nucleares, y su tiempo de vida sería demasiado corto para permitir la evolución de cualquier forma de vida.

Estos datos, que indican que el universo parecería diseñado para favorecer la aparición y supervivencia de la vida, han sido tomados muy en serio por el astrónomo Brandon Carter. Ha señalado que el *Homo sapiens* ha tardado unos cuatro mil millones de años en evolucionar desde que aparecieran las primeras formas de vida sobre la Tierra. También afirma que el período medio de cualquier proceso evolutivo de este tipo debería ser mucho mayor que los 10.000 millones de años de vida de una estrella del tamaño del Sol que el período durante el que la Tierra habrá presentado condiciones favorables para la vida).

De ser así, parecería que la vida inteligente ha vencido serias improbabilidades al hacer su aparición sobre la Tierra. En 1974, esto condujo a Carter a proponer lo que ha denominado el principio antrópico, en otras palabras, que nuestro universo refleja el punto de vista particular de nuestra propia especie. Sus afirmaciones han sido objeto de un minucioso estudio, del que han surgido diversas tesis importantes.

El principio antrópico débil afirma que los rasgos observados en el universo se encuentran restringidos por la necesidad de que se produzca la evolución de formas de vida basadas en el carbono, así como que tiene que existir el tiempo suficiente para que ello se produzca.

Algunos científicos han ido más lejos, llegando a afirmar que el universo fue dispuesto de algún modo con el solo objeto de incorporar al género humano a la existencia. Carter ha denominado esta última idea como principio antrópico fuerte. Según éste, el universo debe tener las propiedades que tiene para *permitir* el desarrollo de vida inteligente. Hay incluso quienes van más allá y afirman que el universo tenía desde el principio que ser de tal modo que la vida inteligente *tuviera* que aparecer.

La palabra «tuviera» ha desencadenado enzarzadas controversias debido a que introduce un principio que parece ajeno a los límites de la ciencia: que el universo fue diseñado con este propósito. Algunos afirman que esto no es sino un concepto metafísico, y la ciencia evita la metafísica. Quienes lo defienden afirman lo contrario, basándose precisamente en lo excepcional que resulta la existencia del género humano.

Ciertamente, el universo posee ciertas propiedades muy específicas que han permitido la evolución del hombre. Dadas estas propiedades, el desarrollo de la humanidad parecería una conclusión planeada de antemano.

Adicionalmente, el género humano posee habilidades únicas. La Tierra ha contemplado el desarrollo de otros animales, pero el ser humano es la única especie que ha sido capaz de formular las leyes físicas y, con ello, comprender la naturaleza del universo.

El hecho de que ello haya sido posible resulta asombroso. ¿Por qué debería el universo resultar comprensible para nosotros? ¿Se trata tan sólo de una coincidencia fantástica o existe algún profundo motivo para que haya sido así? De existir tal motivo, sería cierto que, después de todo, ocupamos un lugar muy especial en el universo.

Si la especie humana ocupa efectivamente una posición privilegiada, cabe preguntarse si es la única que lo hace. ¿Existen en el espacio otras civilizaciones de seres capaces de comprender el universo? Lo ignoramos. Sin embargo, tal y como demuestran las discusiones en torno a la comunicación con otros seres inteligentes (págs. 166-167), no existen pruebas de que nuestros mensajes hayan sido recibidos por nadie, ni tampoco hemos recibido nosotros mensaje alguno enviado a la Tierra. Después de todo, hace ya muchos años que la Tierra despide constantemente señales de radio y televisión, sin que hasta el momento haya podido observarse reacción alguna desde el espacio.

Ello se debe, posiblemente, al hecho de que aún no ha transcurrido el tiempo sufi-



ciente: puede ser necesario que transcurran miles de años antes de que dichas señales alcancen el más cercano de los sistemas estelares habitados por seres inteligentes capaces de responder a ellas. No obstante, el científico norteamericano Frank Tipler opina de otro modo: afirma que cualquier especie inteligente sería capaz de colonizar su propia galaxia transcurridos mil millones de años desde su aparición. Si la humanidad no fuera única, esas otras especies ya deberían haber llegado hasta nosotros.

Si su afirmación es cierta, debemos convencernos de que el hombre ocupa un lugar único en el universo. Semejante postura difiere de las creencias de la antigüedad en tanto que la humanidad no debe ser considerada como el centro físico del universo, si bien coincide en que nos devuelve a un lugar preeminente de la creación.

Según Brandon Carter, uno de los defensores del principio antrópico, *estas criaturas han nacido más de 6.000 millones de años por delante de su tiempo pues ese es el período que debería haber transcurrido para alcanzar tal estado de desarrollo. De este modo, el universo ha sido dispuesto para favorecer el desarrollo de la vida. Algunos defensores de esta teoría opinan que el universo ha sido específicamente diseñado para favorecer la evolución del género humano.*



LA CREACIÓN DEL UNIVERSO

¿Reside la realidad en el ojo del observador?

El principio antrópico nos sitúa cara a cara con el problema de la naturaleza del universo y del lugar que ocupamos en él. Hoy, el universo no debe ser contemplado como un mecanismo de relojería, tal y como en otro tiempo hicieran los filósofos, sino como un mundo en el que intervienen elementos de azar. Debe visualizarse como una imagen borrosa cuyas partículas parecerían ondas o rizos en lugar de puntos. Más aún, los seres humanos, en tanto que observadores, parecen desempeñar en el universo un papel más importante del que hubiéramos imaginado hasta ahora.

Un científico puede tener la certeza de que un electrón está en cierto lugar tan sólo si allí se produce determinado acontecimiento. Hasta que el observador no interviene, ni siquiera puede decirse de él que ocupe una posición definida.

Esta observación ha conducido a algunos físicos a resucitar la opinión expresada por el obispo George Berkeley, contemporáneo de Isaac Newton, quien afirmaba que «...ninguno de los cuerpos que componen la inmensa estructura del mundo... puede subsistir desprovisto de mente».

El físico puede perseguir esta corriente de pensamiento mediante un experimento en el cual se divide un haz de fotones en dos haces superpuestos que interfieren entre sí. Si los proyectamos sobre una pantalla, observaremos un modelo de interferencia en el que aparecerán franjas oscuras y luminosas alternativamente. Las zonas iluminadas son el resultado de las ondas de fotones que se refuerzan entre sí, mientras que las zonas oscuras estarían causadas por ondas que se neutralizan mutuamente.

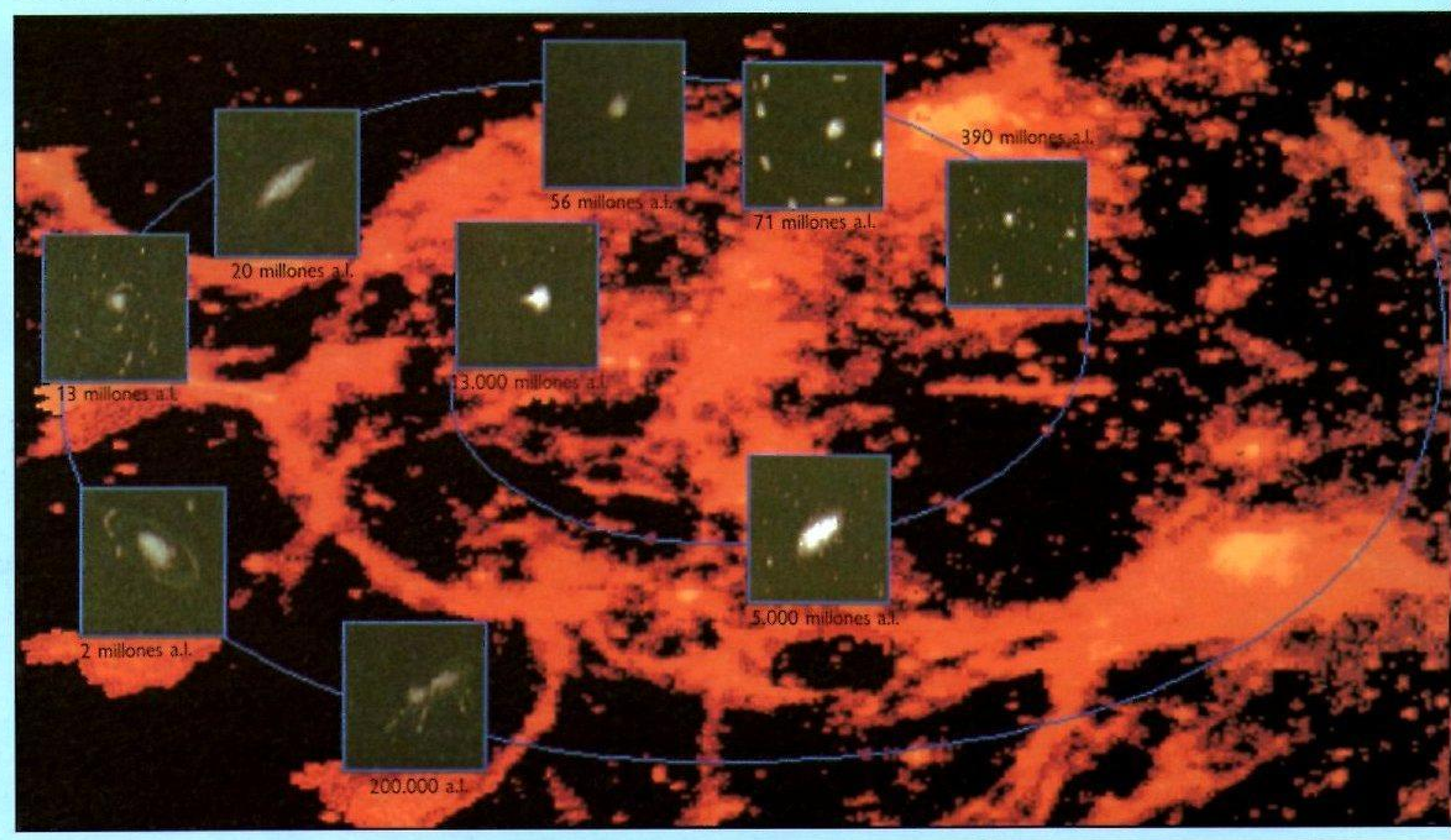
Supongamos ahora que el haz original es atenuado de tal modo que el número de fotones se vea drásticamente reducido hasta que, por fin, los fotones no atraviesen el aparato sino de uno en uno. Incluso en estas condiciones pueden observarse interferencias. Si bien nadie puede decir dónde irá a parar un fotón determinado, resulta más probable que caiga sobre una zona iluminada de la pantalla que sobre una oscura. Si se produce el suficiente número de acontecimientos de esta clase, volverá a formarse el modelo de interferencia. Aunque el aparato sólo produce un fotón en cada instante determinado, cada uno de estos fotones parece interferirse a sí mismo... como si se hallara presente en ambos haces.

Si los científicos aumentan su investigación añadiendo detectores, descubrirán cuál de los dos posibles caminos ha seguido el fotón, aunque para ello deberán destruir el modelo de interferencia. Al obligar al fotón a comportarse como una partícula, impiden que muestre un comportamiento ondulatorio. Dicho de otro modo, sólo cuando la partícula es detectada —observada— puede decirse que constituye una partícula completa o real. A ello se debe que algunos físicos afirmen que el universo depende de nuestras observaciones. Y dado que todo lo que observamos se halla compuesto por partículas subatómicas, el mismo argumento debería ser aplicable a la totalidad del universo.

Durante la década de los treinta, el astrofísico británico Arthur Eddington señaló que cuando examinamos el universo descubrimos un modelo de huellas, y que cuando estudiamos estas últimas hallamos el rastro de la humanidad: nuestras teorías del universo poseen características que surgen del hecho de que son obra del hombre.

Sin embargo, algunos científicos cuánticos llegan hoy más lejos, afirmando que el universo existe porque nosotros estamos aquí para observarlo. El principio antrópico fuerte estipula que el universo se halla construido de tal modo que *tiene* que dar lugar forzosamente al nacimiento de vida inteligente; sin embargo, según el físico norteamericano John Wheeler, la física cuántica demuestra que sin la participación del observador no existiría el universo.

Si este principio antrópico de participación fuera cierto, nuestras observaciones afectarían tanto a hechos ocurridos en el pasado como a los del presente. Cuando,

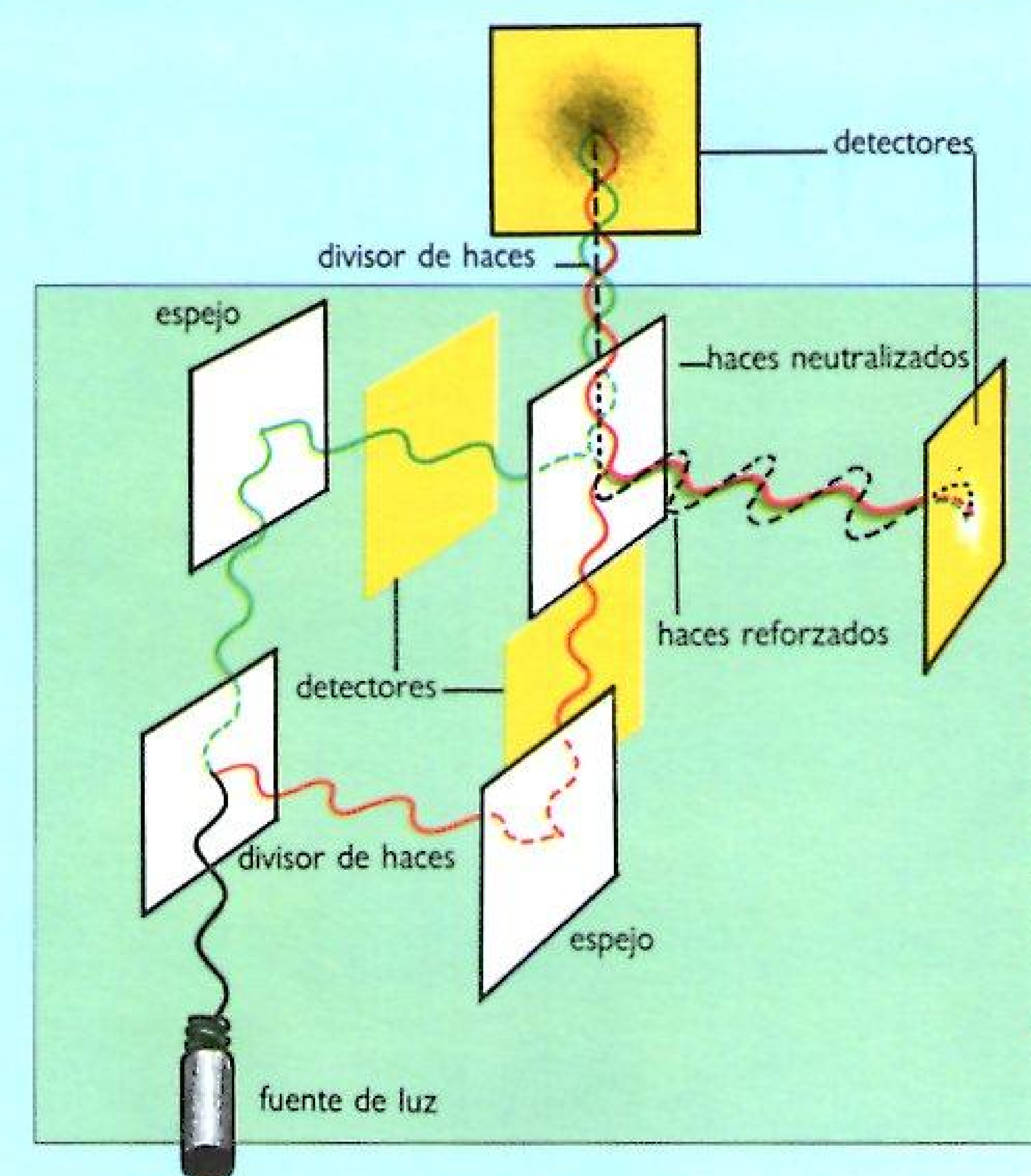


por ejemplo, observamos un quasar distante, sus fotones alcanzan una existencia real en el momento de ser observados. Durante los miles de millones de años previos a su observación no existieron por completo, ni tampoco el propio quasar, al menos en lo que respecta a algunas de sus propiedades. Todo lo que sucede en el universo depende de la inteligencia que lo asimile: sin ella, no existe nada.

Según este punto de vista, el futuro del universo plantea un grave problema, pues parecería que el género humano tendría que hallarse siempre presente para garantizar su existencia. El físico norteamericano Frank Tipler posee la certeza de que no existen seres inteligentes en otro lugar que no sea la Tierra, si bien señala que la presencia de la humanidad no es esencial para satisfacer las condiciones del principio antrópico de participación; lo que sí es necesario es la existencia continuada de un alto nivel de inteligencia. Su solución, por tanto, consistiría en distribuir copias de la inteligencia humana por todo el universo.

Tipler sugiere que la mente es fundamentalmente un programa de ordenador. En la actualidad, se halla residente en un determinado tipo de computadora —el cuerpo humano— pero, afirma, lo importante es el programa en sí. Así, confía en la creación de ordenadores que sean copias de nosotros mismos. Entonces, incluso si la humanidad se viera destruida cuando el Sol se convierta en una gigante roja, existirían copias de la inteligencia humana capaces de contemplar el universo eternamente, o hasta que tuviera lugar el *Big Crunch*. De este modo, continuaría satisfaciéndose el principio antrópico de participación.

Como cabría esperar, son escasos los científicos que defienden este principio. Para la mayoría, resulta antropocéntrico hasta un grado extravagante, pues convierte al ser humano no sólo en el centro de todas las cosas, sino en la medida, y hasta el creador, del universo.



***Un observador puede imponer una forma de comportamiento** de partícula u onda a la luz. En la ilustración, un haz dividido, recombinado y sólo entonces observado se interfiere a sí mismo, de modo que el detector superior no recibe luz. Sin embargo, si insertamos los detectores antes de que se produzca la interferencia, éstos nos muestran el recorrido seguido por cada fotón. Ello obliga a la luz a comportarse en forma de partícula y destruye los efectos de interferencia.*

***Al contemplar el espacio** (abajo, izquierda) se vislumbra el pasado (abajo). Vemos la Pequeña Nube de Magallanes como era hace 200.000 años, cuando el* Homo sapiens *acababa de surgir; la galaxia de Andrómeda cuando vivían en la Tierra otra clase de seres humanos, hace 2 millones de años; las galaxias situadas más allá del Grupo Local aparecen como hace unos 13-20 millones de años, cuando surgieron los primeros simios. La luz de la galaxia M77 comenzó a viajar hace 56 millones de años, cuando hacía poco que los dinosaurios se habían extinguido, y la del cúmulo de Virgo data de hace 71 millones de años, cuando dominaban la Tierra. Y hasta quasares de hace 13.000 millones de años, cuando se formó nuestra galaxia.*

LO PRIMERO Y LO ÚLTIMO

Nuevos universos que nacen de las cenizas del antiguo

La historia de la conciencia del universo por parte de la humanidad posee horizontes cada vez más amplios. Hoy, observamos un universo que se extiende hasta distancias inmensas a lo largo del espacio y que alcanza eones hacia el pasado y hacia el futuro: una complejidad que supera con creces la que pudieran haber imaginado incluso los más avanzados filósofos griegos. Hoy día hemos logrado reunir un impresionante cúmulo de pruebas que demuestran que habitamos un universo en expansión nacido del *Big Bang*, pero ¿acaso se reduce a eso la suma de todo lo que existe?

El científico hindú Jayant Narlikar opina que el universo que observamos podría ser uno más de los numerosos universos en expansión existentes a lo largo de un espacio infinitamente más inmenso. El hiperuniverso de Narlikar podría describirse como un gigantesco contenedor de líquido en ebullición, en el que nuestro universo sería una de las burbujas, mientras que cada una de las restantes formaría un universo.

No es ésta la única teoría propuesta hasta ahora para describir un sistema masivo que comprendiera otros universos mayores que el que conocemos. Otros se sirven de la idea de que a través de un agujero negro podría ser posible alcanzar otra región completamente distinta del espacio. La matemática demuestra que, al menos en teoría, un agujero negro podría hallarse conectado con otras regiones del espacio-tiempo por medio de un «agujero de lombriz», esto es, un tubo arrollado sumamente delgado que atravesara otras dimensiones. El otro extremo del tubo sería un agujero blanco que expulsara materia en lugar de absorberla.

Un tubo semejante se desintegraría tan pronto como se formara a no ser que imperaran determinadas condiciones cuánticas: la creación en su interior de energía negativa. La existencia de energía negativa, predicha originalmente por el físico inglés Paul Dirac a finales de la década de 1920, puede parecer algo extraño, pero se trata de un concepto completamente realista que condujo al descubrimiento del positrón en 1932 y que se halla relacionado con la existencia de las antipartículas en general. Los «agujeros de lombriz», si es que existen, mostrarían extrañas propiedades, entre ellas el hecho de que en determinadas circunstancias permitirían, a los objetos que cayeran en ellos, viajar hacia atrás en el tiempo.

El físico norteamericano Lee Smolin ha desarrollado las ideas en torno a los agujeros negros y a los «agujeros de lombriz» hasta llegar a la cuestión del nacimiento y muerte del universo. El interior de un agujero negro puede imaginarse como algo «arrebatado» al cuerpo principal del espacio-tiempo por medio de un diminuto cuello similar a un agujero de lombriz real. Sin embargo, desde el interior de un agujero negro parecería un espacio en expansión... de hecho, un universo en expansión.

Un agujero negro no siempre contendrá un universo en expansión de larga vida: numerosos agujeros negros se «evaporan» tras un tiempo relativamente corto (pág. 65). Sin embargo, Smolin ha demostrado que, si logra durar el tiempo suficiente, el agujero dará lugar a un universo en expansión.

La formación de dicho universo será violenta, y el resultado podría ser que ciertos procesos físicos y «constantes» se vieran modificados. Más o menos del mismo modo que cada generación de seres vivos varía al azar dentro de estrechos límites debido a los súbitos cambios genéticos del ADN, también la física de los universos recién nacidos variaría de un modo aleatorio.

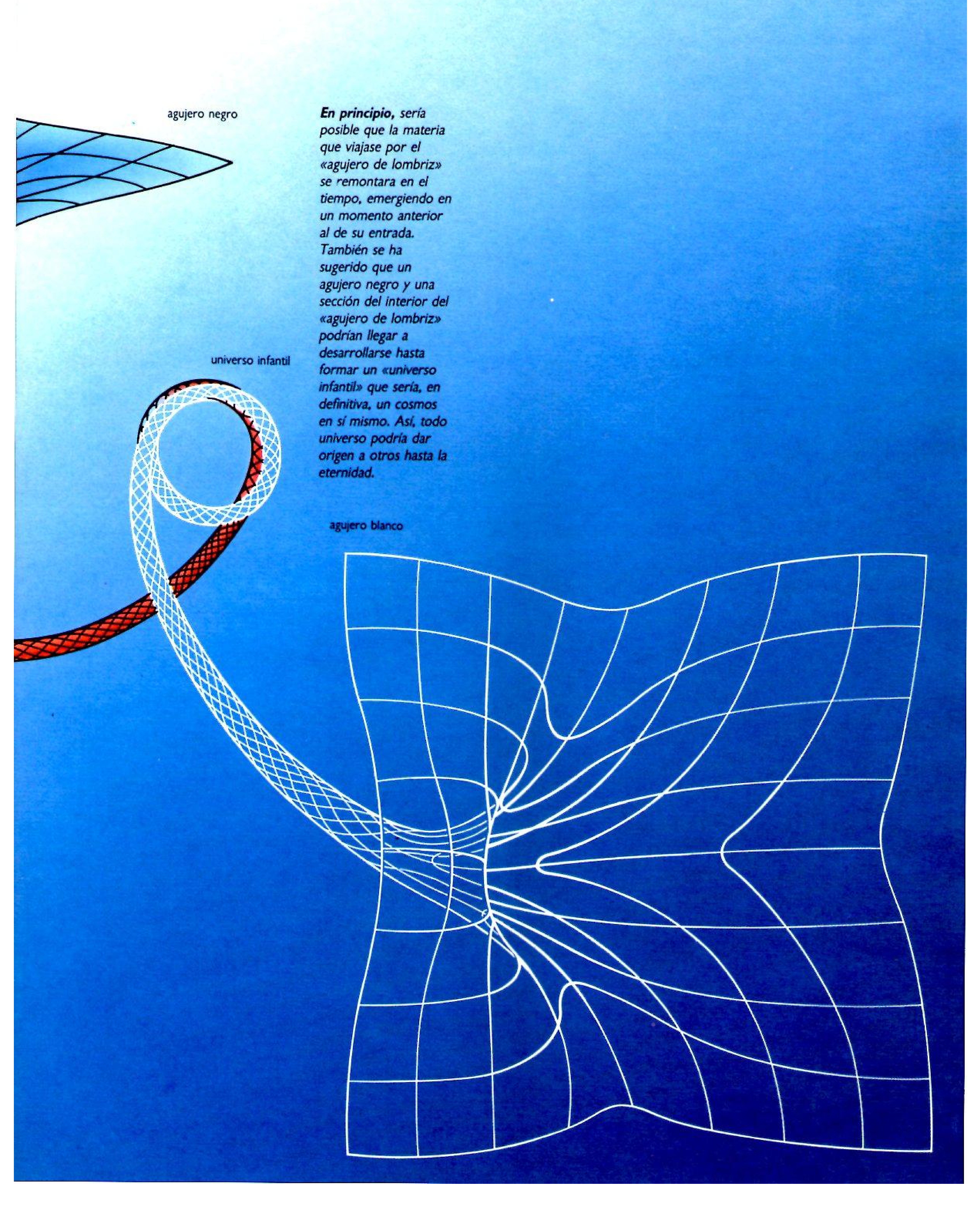
Algunos universos evolucionarían con éxito, y durarían lo bastante para dar lugar a la formación de numerosos agujeros negros como resultado de la muerte de estrellas masivas o la fusión de estrellas en núcleos galácticos, etc. Cada uno de estos agujeros negros daría lugar a un nuevo universo. Smolin calcula que en cualquier universo de larga vida las masas de los protones y los neutrones, por ejemplo, serán casi iguales entre sí, tal y como es el caso del nuestro. Así, dichos universos no serían muy distintos del que habitamos.

El resultado de todo ello es que los universos que prosperaran serían aquellos en los que las condiciones permitieran su desarrollo completo, incluida la producción de vida y la evolución de la inteligencia. Así, no deberíamos sorprendernos de la importancia que se presta al principio antrópico en nuestro propio universo, el cual parece perfectamente adaptado a las exigencias de la vida: ello no es sino el efecto de selección entre un inmenso número de universos, de los que la mayoría no prosperaron.

Un «agujero de lombriz» que atravesara dimensiones superiores *podría unir diferentes regiones del espacio-tiempo. Una de las bocas de la gujero sería uno negro que arrastraría materia y energía; la otra sería uno blanco del que surgirían también materia y energía. La región intermedia, el «agujero de lombriz» no podría observarse desde el universo exterior.*

No debe inquietarnos el problema de una primera causa que explicara el *Big Bang*, pues éste habría nacido de un universo previo. El universo de Smolin duraría eternamente, y se propagaría hasta el infinito dando lugar a nuevos universos.

Tan sólo por medio de ulteriores investigaciones podremos saber cuánta verdad hay en esta propuesta tan especulativa e, igualmente, en todas las demás que se han sugerido. Empero, acaso con la teoría de Smolin acerca de universos autopropagantes nacidos de las cenizas de los anteriores hallamos retornado al punto de partida, a ideas primitivas que hoy, sin embargo, se ven respaldadas por cálculos científicos. Sólo el tiempo lo dirá.



En principio, *sería posible que la materia que viajase por el «agujero de lombriz» se remontara en el tiempo, emergiendo en un momento anterior al de su entrada. También se ha sugerido que un agujero negro y una sección del interior del «agujero de lombriz» podrían llegar a desarrollarse hasta formar un «universo infantil» que sería, en definitiva, un cosmos en sí mismo. Así, todo universo podría dar origen a otros hasta la eternidad.*

MAPAS ESTELARES

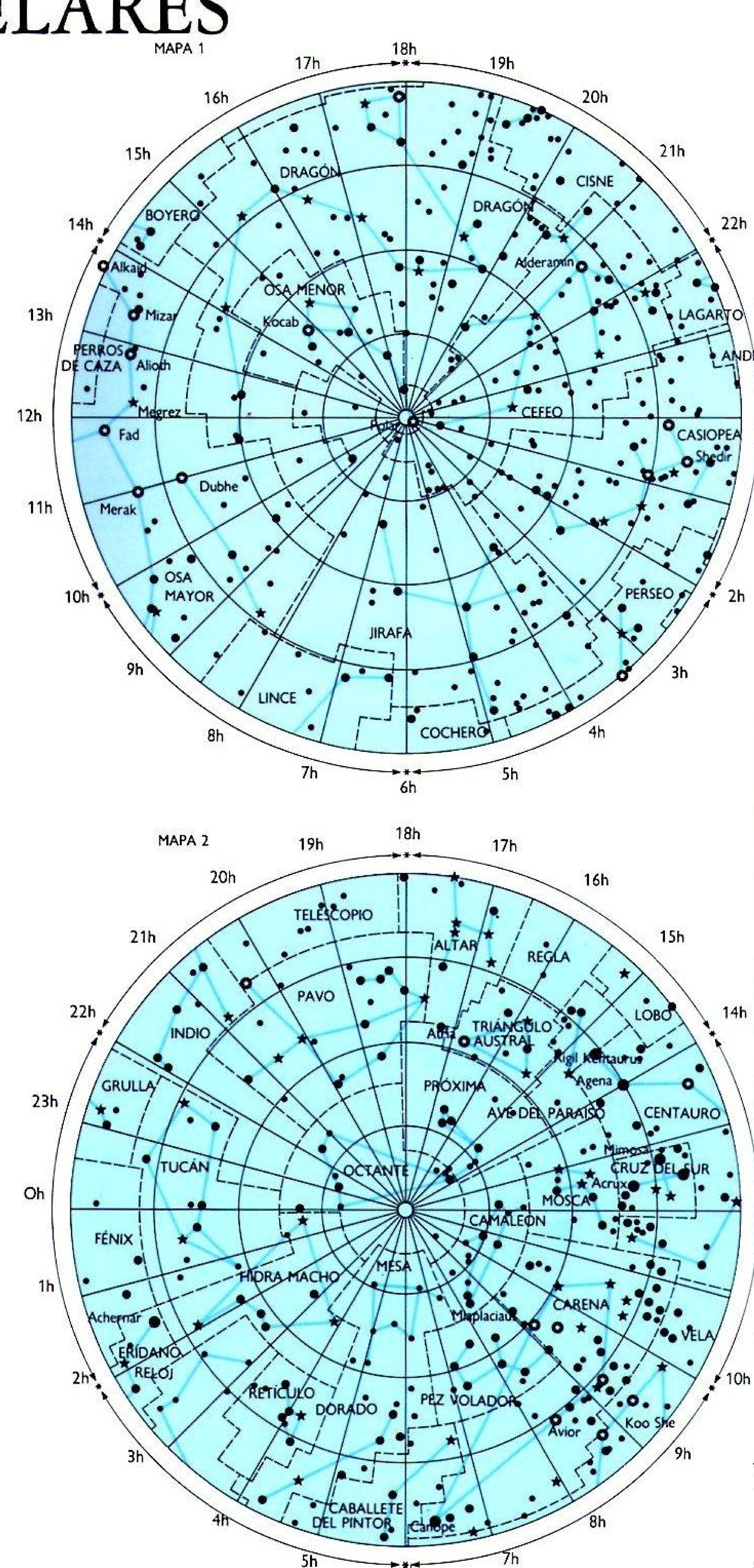
Los mapas que ofrecemos a continuación muestran las estrellas fijas más brillantes, hasta la quinta magnitud. Los mapas 1 y 2 representan las regiones polares, hasta una declinación de 40 grados (equivalente celestial de la latitud terrestre) a partir de los polos. Los mapas 3 a 8 muestran el resto del cielo. Las distancias a lo largo del ecuador celeste han sido medidas en horas, minutos y segundos de ascensión recta o AR (equivalente celeste de la longitud terrestre). Cada uno de los seis mapas ecuatoriales cubre por tanto cuatro horas de AR.

El nombre de las constelaciones aparece en letras mayúsculas. Sus fronteras, delimitadas por la Unión Astronómica Internacional, han sido representadas por líneas rectas discontinuas. Los nombres de las estrellas más importantes aparecen anotados en mayúsculas y minúsculas indistintamente.

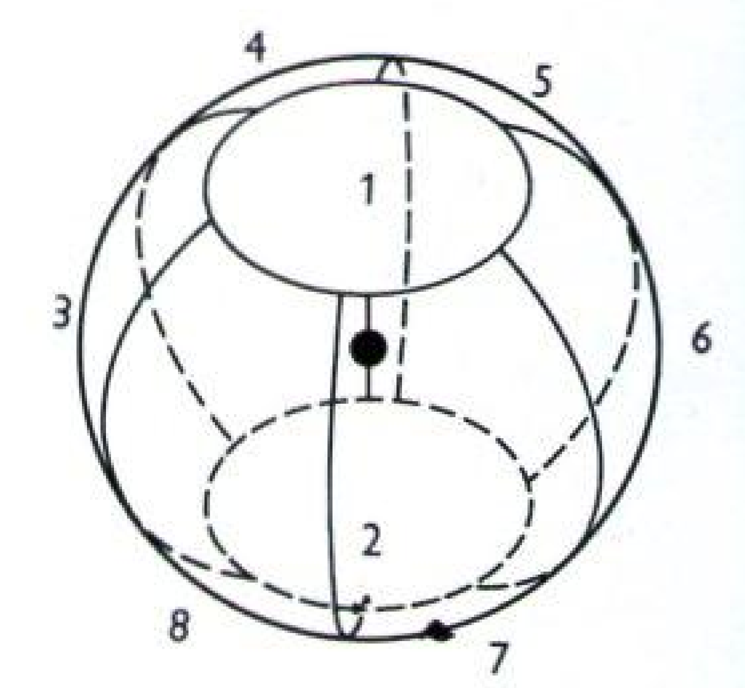
El único objeto móvil aquí representado es el Sol. A lo largo de un año, el Sol parece desplazarse por el firmamento hacia el este en relación con el escenario compuesto por las estrellas fijas, recorriendo una trayectoria denominada eclíptica. Así, en marzo, atraviesa el ecuador celeste en dirección norte a por uno de los equinoccios, punto que se define como cero de la ascensión recta. Alcanza su punto más septentrional —el solsticio— en el mes de junio. Luego, atraviesa el ecuador celeste por el otro equinoccio en dirección sur el mes de septiembre (a las 12h de AR), y alcanza su punto más meridional en diciembre.

A partir de lo anterior, resulta posible calcular que durante mayo, por ejemplo, el Sol está en las 4h de AR (Tauro). Las estrellas visibles durante dicho mes se hallarán en la parte opuesta del cielo, centrada sobre las 16h de AR.

Los siguientes mapas cubren la totalidad del firmamento, pero la zona realmente visible se halla, claro está, delimitada por la latitud del observador. Un observador situado, digamos, en París (a 49 grados de latitud norte) no puede contemplar el cielo situado al sur de una línea que se extienda a 49 grados de polo sur celeste (esto es, 41 grados al sur del ecuador); por su parte, uno situado en Melbourne (a 38 grados de latitud sur) sólo alcanzará a ver los puntos situados por debajo de los 52 grados al norte del ecuador.



- 1.ª magnitud
- 2.ª magnitud
- 3.ª magnitud
- 4.ª magnitud
- 5.ª magnitud



MAPA 3

Declinación

+50° +40° +30° +20° +10° 0° -10° -20° -30° -40° -50°

2h 1h 0h 23h 22h

LAGARTO
M 31
Almaak
Mirach
ANDRÓMEDA
TRIÁNGULO
Scheat
Alferatz
PEGASO
Markab
ARIES
Algenib
PECES
Eclíptica
Ecuador celeste
Sadalmelik
BALLENA
ACUARIO
Difda
Formalhaut
HORNO
TALLER DE ESCULTOR
PEZ AUSTRAL
FÉNIX
Ankaa
GRULLA
Alnair

Ascensión recta

MAPA 4

Declinación

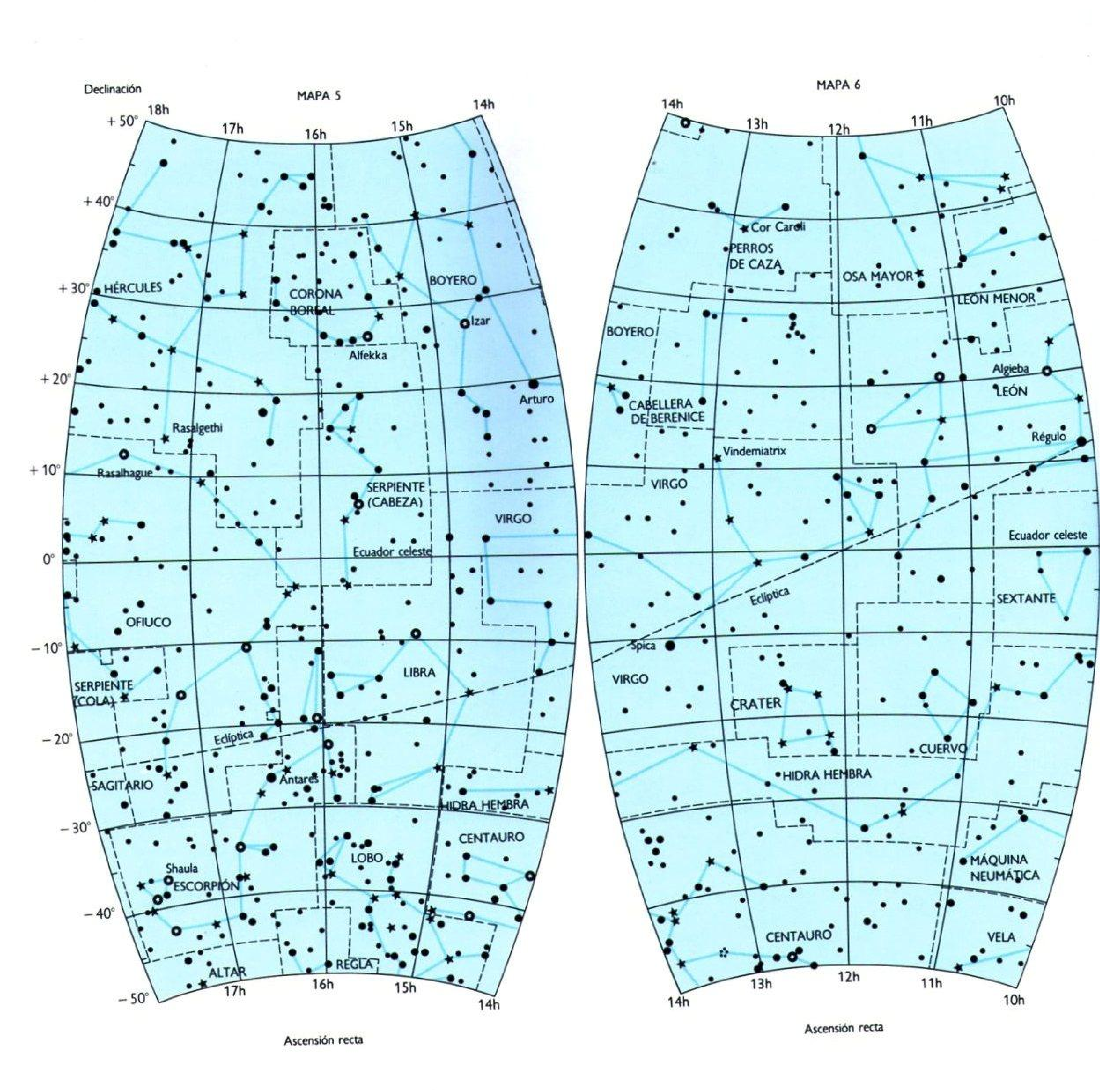
+50° +40° +30° +20° +10° 0° -10° -20° -30° -40° -50°

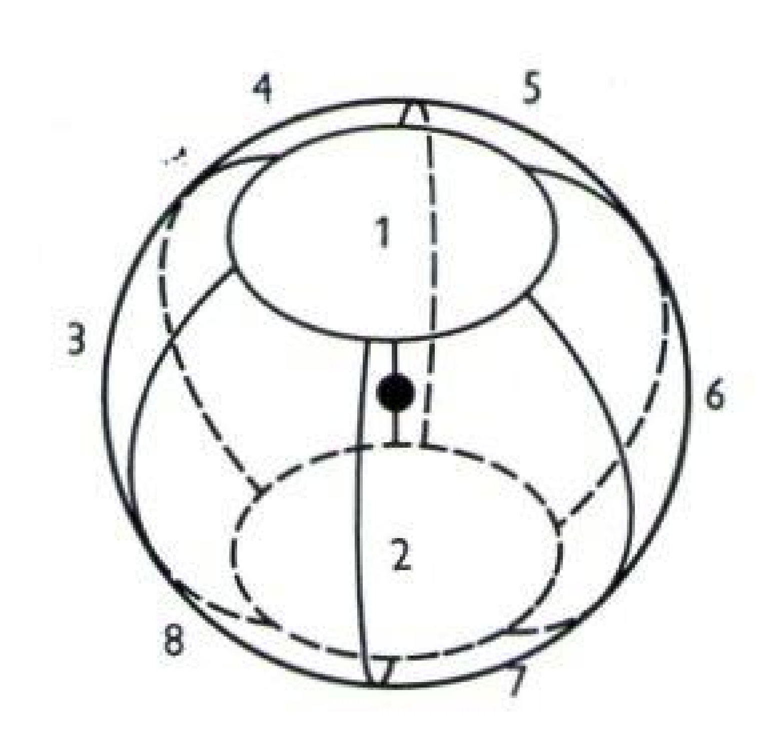
22h 21h 20h 19h 18h

Deneb
Vega
CISNE
LIRA
ZORRA
SAGITARIO
HÉRCULES
PEGASO
Enif
Altair
ÁGUILA
OFIUCO
CABALLO MENOR
DELFÍN
Ecuador celeste
ACUARIO
SERPIENTE (COLA)
ESCUDO
Eclíptica
CAPRICORNIO
PEZ AUSTRAL
SAGITARIO
MICROSCOPIO
GRULLA
CORONA AUSTRAL
TELESCOPIO
INDIO

Ascensión recta

1.ª magnitud
2.ª magnitud
3.ª magnitud
4.ª magnitud
5.ª magnitud





Declinación

MAPA 7

10h 9h 8h 7h 6h

OSA MAYOR
LINCE
LEÓN MENOR
COCHERO
Cástor
Pollux
CÁNCER
LEÓN
GÉMINIS
Eclíptica
ORIÓN
Procyon
CAN MENOR
Ecuador celeste
SEXTANTE
Alfard
UNICORNIO
Sirio
Mirzam
HIDRA HEMBRA
LIEBRE
Wezen
CAN MAYOR
MÁQUINA NEUMÁTICA
BURIL
POPA
PALOMA
VELA

10h 9h 8h 7h 6h

Ascensión recta

MAPA 8

6h 5h 4h 3h 2h

+ 50°
Capella
Mirphak
ANDRÓMEDA
COCHERO
+ 40°
Algol
PERSEO
+ 30°
ARIES
+ 20°
Pléyades
Híadas
Aldebarán
TAURO
Eclíptica
+ 10°
ORIÓN
Betelgeuse
Menkar
BALLENA
Ecuador celeste
0°
Rigel
Mira
− 10°
Saif
ERÍDANO
BALLENA
Arneb
Nihal
LIEBRE
− 20°
HORNO
− 30°
PALOMA
COPA
− 40°
Acamar
CABALLETE DEL PINTOR
− 50°

6h 5h 4h 3h 2h

Ascensión recta

Glosario

(Los términos señalados con * poseen entrada propia en el glosario)



aberración de la luz
Cambio anual aparente en la posición de las estrellas frente al fondo formado por otras estrellas más distantes. Se halla causado por el movimiento orbital de la Tierra. El cambio puede producirse en sentido circular, elíptico o incluso limitado a una línea de poca longitud, dependiendo del alejamiento superior o inferior de la estrella del plano orbital terrestre.

acimut
Ángulo entre el punto del horizonte situado directamente bajo un objeto celeste y el punto norte.

afelio
Punto más distante del Sol en la órbita de cualquier cuerpo del sistema solar, ya se trate de un planeta, un asteroide, un cometa, un conjunto de materia interestelar o un satélite artificial.

agujero negro
Región del espacio-tiempo en la que existe una concentración de materia tan inmensa en el interior de un espacio reducido que el espacio-tiempo se curva sobre sí mismo impidiendo que escapen la materia y la energía.

albedo
Potencia de reflexión de un cuerpo celeste no radiante. El albedo se calcula como la relación entre la cantidad total de luz reflejada en todas direcciones y la cantidad de luz recibida. El albedo de la Luna es tan sólo de 0,07, pero el de Júpiter es de 0,43. El del brillante y nuboso planeta Venus es de 0,76.

altitud
Ángulo formado entre un cuerpo celeste y el horizonte.

ángulo horario
Ángulo situado en la esfera celeste entre un objeto celeste y el meridiano* del observador. Se mide en dirección oeste a lo largo del ecuador celeste por medio de horas, minutos y segundos.

antimateria
Partículas atómicas y nucleares elementales que poseen la misma masa que la materia ordinaria pero carga eléctrica opuesta. La materia y la antimateria se aniquilan mutuamente al entrar en contacto.

año luz
Medida de distancia, no de tiempo. Expresa la distancia recorrida por la luz o por cualquier otra radiación electromagnética durante un año, y asciende a $9{,}4607 \times 10^{12}$ km.

apertura
Diámetro total de una lente, espejo o cualquier otra superficie receptora de radiación en un telescopio o separación entre las antenas de un radiotelescopio. La capacidad de un telescopio para observar detalles o separar objetos cercanos entre sí es mayor cuanto mayor es la apertura.

ápex solar
Punto en el firmamento hacia el que parece desplazarse el Sol con respecto a las estrellas de nuestra región galáctica central. Se halla situado en la constelación de Hércules. El Sol se aproxima a él a una velocidad de 19,5 km/s.

apogeo
Punto más distante del centro de la Tierra en la órbita de la Luna o de un satélite artificial.

ascensión recta
Ángulo entre los meridianos* del equinoccio vernal y de un cuerpo celeste (*véase* esfera celeste).

asteroide
Planeta menor —o planetoide— situado en órbita en torno al Sol. La mayoría de los asteroides viaja entre las órbitas de dos planetas mayores —Marte y Júpiter— siguiendo recorridos próximos al plano de la órbita terrestre. Su diámetro puede variar entre 1 km o menos y los 914 km del mayor de ellos, Ceres.

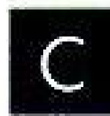
átomo
En los elementos químicos, es la parte más pequeña capaz de intervenir en una reacción química y conservar su identidad.

Todos los átomos constan de un núcleo y de uno o más electrones que giran en órbita en torno a él formando grupos. Las reacciones del núcleo pueden producir la transformación de un tipo de átomo en otro. En el estado normal del átomo, el número de electrones es igual al número de protones del núcleo, con lo que el átomo se mantiene neutro. La mayor parte de la masa atómica reside en el núcleo.

aurora
Fenómeno de luz brillante de varios colores que se produce en la atmósfera terrestre a altitudes de unos 100 km y que adopta forma de cortina, arco o caparazón. Las auroras terrestres tienen lugar habitualmente a menos de 20 grados de distancia de los polos magnéticos, y aparecen simultáneamente en los hemisferios norte y sur.



bosones
Partículas subatómicas dotadas de unidades enteras de spin (0, 1, 2, etc.). Los fotones, mesones y otras partículas mensajeras son bosones, al igual que ciertos núcleos atómicos en los que los neutrones igualan en número a los protones.



cadena cósmica
Delgada cadena de energía atrapada procedente de los primeros momentos del *Big Bang*. Posee una inmensa masa por unidad de longitud. Las cadenas cósmicas pueden haber actuado como simiente para la formación de galaxias, cúmulos y supercúmulos.

campo
Zona en la que actúa una fuerza.

campo de Higgs
Campo de mecánica cuántica. En su estado de energía más bajo, un campo de Higgs induce una rotura espontánea de simetría (*véase* simetría), y posee gran importancia en las teorías que intentan unificar las fuerzas fundamentales de la naturaleza. El campo se asocia con las partículas de Higgs, análogas a los fotones en los campos electromagnéticos.

capa de ozono
Manto de ozono que descansa a una altura de entre 12 y 50 km sobre la superficie de la Tierra. Es el resultado de la acción de la radiación solar ultravioleta sobre el oxígeno atmosférico, y posee una importancia vital para la vida terrestre ya que absorbe la nociva radiación ultravioleta procedente del Sol.

cefeida variable
Una clase de estrellas variables. Su prototipo es Delta Cefeo, cuya variabilidad fue descubierta en 1784. Se trata de estrellas pulsantes cuyo brillo varía en ciclos de entre 1 y 50 días.

cenit
Punto celeste situado directamente encima del observador.

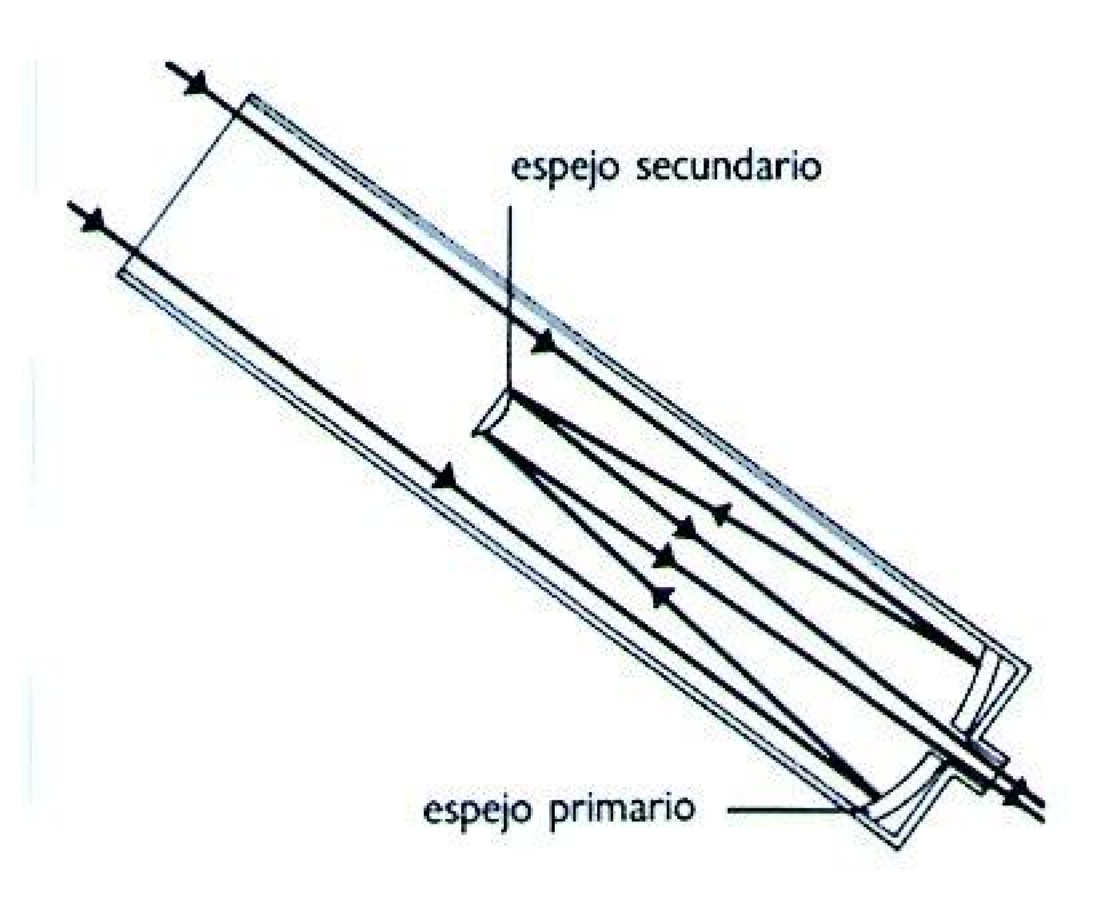
centro de la masa
Punto de cualquier sistema material en el que se considera concentrada su masa total.

cinturones de Van Allen
Dos regiones del campo magnético o magnetosfera terrestre en las que se ven atrapadas las partículas atómicas dotadas de carga eléctrica.

clase espectral
Clasificación de las estrellas según su espectro. Diseñada originalmente como consecuencia alfabética de tipos, esta clasificación muestra hoy el orden O, B, A, F, G, K y M. Se trata de una secuencia de colores y temperaturas que va desde la O —correspondiente a estrellas muy blancas y azules sumamente calientes y brillantes— hasta la M, utilizada para definir estrellas rojas y frías de brillo mucho menor.

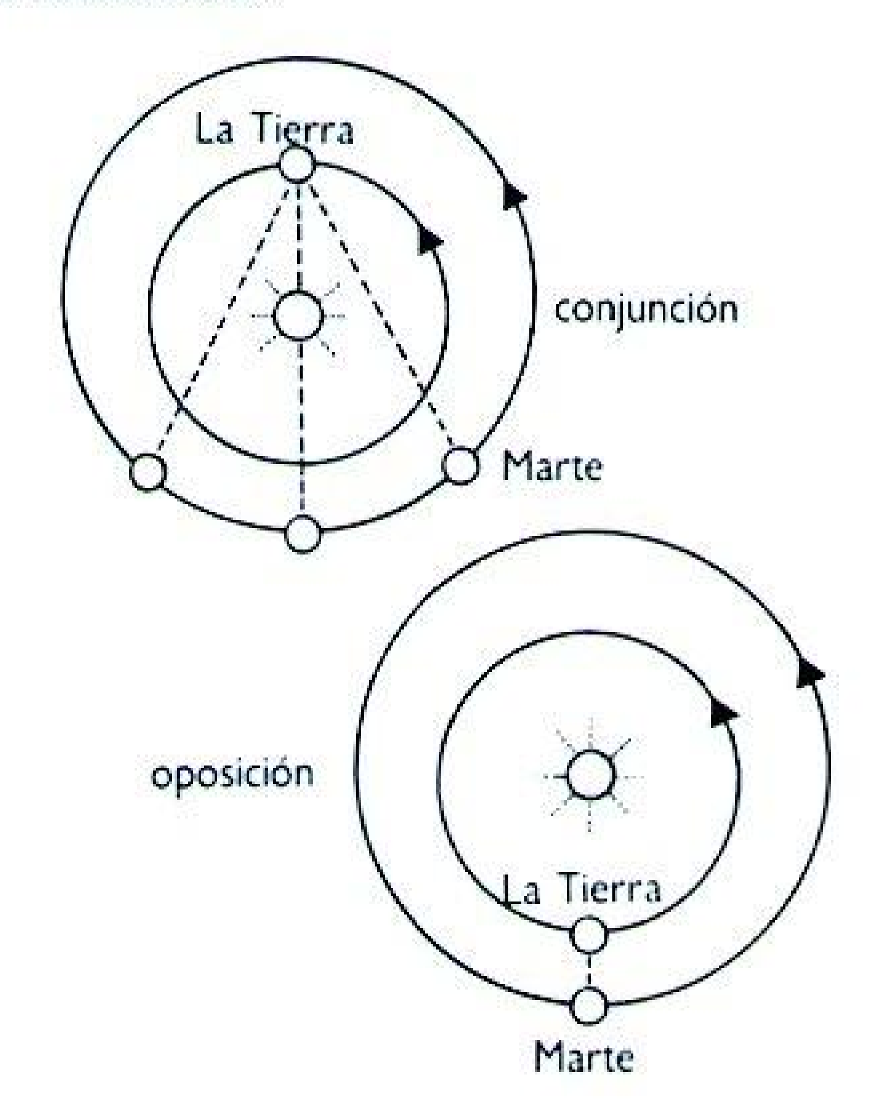
combinación de Cassegrain
Sistema de enfoque en el que la luz recogida por

el reflector primario (o espejo) de un telescopio es reflejada hacia un foco detrás del espejo, a través de un orificio de éste.



cometa
Cuerpo congelado compuesto de materia rocosa, metálica y carbonácea. La mayor parte de ellos gira en órbita en torno al Sol describiendo trayectorias marcadamente elípticas.

conjunción y oposición
Puntos de las órbitas de los planetas, asteroides y cometas. La conjunción tiene lugar cuando el cuerpo situado en órbita se halla en línea con el Sol visto desde la Tierra. El cuerpo aparece en el cielo matutino cuando se aproxima la conjunción (1) y en el vespertino después de la conjunción (2). La oposición tiene lugar cuando un cuerpo dotado de una órbita mayor que la de la Tierra se encuentra situado en el lado opuesto al Sol en el firmamento.



cono de luz
Descripción mediante los sucesos en el espacio-tiempo mediante el dibujo de un cono que representa el espacio en el que se esparcirá con el tiempo la luz procedente de un suceso dado.

constante de Hubble
Razón a la que aumenta la velocidad de recesión de las galaxias con su distancia. Actualmente, existen dudas acerca de su valor, estimado entre 17 y 30 km/s por cada millón de años luz.

constante solar
Potencia radiante total recibida por unidad de área en la Tierra, tal como se mediría en la parte superior de la atmósfera terrestre. Es igual a 1.367 kilovatios por metro cuadrado.

constelación
Tradicionalmente, agrupación de estrellas que forman un dibujo fijo, si bien hoy día los límites de las constelaciones se hallan trazados por coordenadas acordadas por la Unión Astronómica Internacional. Los agrupamientos de estrellas en constelaciones no implican necesariamente una conexión física entre ellas.

coordenadas
Sistemas matemáticos empleados para trazar posiciones. Las coordenadas **cartesianas** se refieren a direcciones mutuamente particulares, y se designan con las letras x, y, z, etc. Las coordenadas **polares** utilizan ángulos y la distancia radial r. En la esfera celeste*, la distancia radial es tomada igual a 1 y la posición de cualquier objeto es especificada únicamente por medio de dos ángulos.

corona
Atmósfera externa del Sol. Se extiende a unos 10.000 km por encima de la fotosfera y es extremadamente tenue (más de un billón de veces menor que la densidad de la atmósfera terrestre). Se compone de electrones de alta energía y alcanza una temperatura de unos dos millones de grados a 75.000 km de altitud. Es visible únicamente durante los eclipses solares totales o por medio de instrumentos especiales. Emite rayos X y radiación ultravioleta.

corrimiento al azul
Corrimiento de las líneas del espectro hacia el extremo azul. Indica que el objeto que lo irradia se desplaza hacia nosotros.

corrimiento gravitacional al rojo
Leve corrimiento hacia el rojo de las líneas espectrales de la radiación emitida por un cuerpo, como consecuencia de su masa. Se trata de un efecto predicho por la relatividad general.

corrimiento al rojo
Corrimiento de las líneas espectrales hacia la zona roja —o de longitud de onda larga— del espectro. Por lo general, indica que la fuente emisora de radiación se aleja del observador, pero puede ser causado también por la acción del campo gravitatorio de la misma.

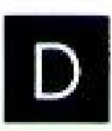
cráter
Depresión circular de poca profundidad hallada en numerosos cuerpos del sistema solar y debida probablemente al impacto de otro cuerpo.

cromosfera
Capa del Sol situada directamente sobre el disco o fotosfera.

cuerpo negro
Cuerpo hipotético que absorbe toda la radiación que llega a él, sea cual fuere su longitud de onda. Semejante cuerpo emite luz dotada de un espectro* característico. En ciertos aspectos, las estrellas se comportan como los cuerpos negros, lo que permite a los astrofísicos explicar la relación existente entre su color, temperatura y radiación.

cúmulo abierto (o conglomerado abierto).
Cúmulo de estrellas de nuestra galaxia con menos de 100 miembros relativamente espaciados entre sí. Las Híadas y las Pléyades constituyen notables ejemplos.

cúmulo globular (o conglomerado globular)
Cúmulo de estrellas relativamente denso y de forma esférica. Puede contener entre unas pocas decenas de miles y más de un millón de estrellas. Uno de los componentes del halo* de la Galaxia son cientos de cúmulos globulares.


D

declinación
Ángulo entre el ecuador celeste y un cuerpo celeste. Se mide con relación al norte o al sur. (*Véase* esfera celeste.)

degeneración
Estado anormal de la materia en el que, debido a una presión y temperatura muy elevadas, los átomos se ven despojados de sus electrones para formar una masa de núcleos envueltos en un gas de electrones. Su densidad puede ser de varias toneladas por centímetro cúbico. Las regiones centrales de las enanas blancas y de las estrellas de neutrones se componen de esta clase de materia.

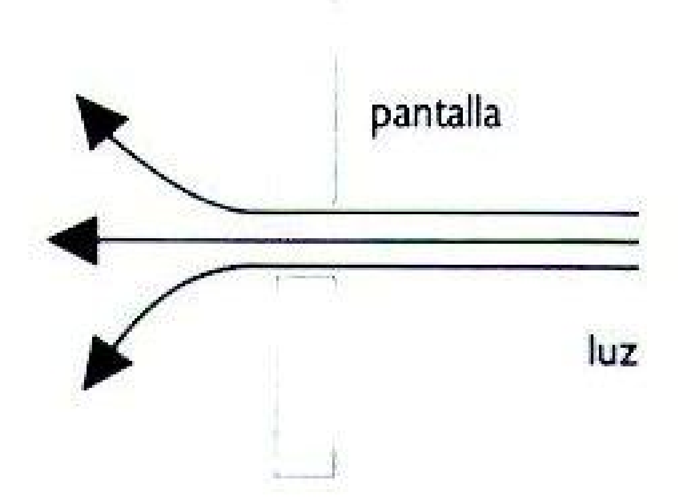
día sideral
Período de rotación de la Tierra con respecto al equinoccio vernal (*véase* esfera celeste). Se halla establecido en 23 h 56 m 4,09 s.

diagrama de Hertzsprung-Russell
Gráfico en el que las magnitudes absolutas de las estrellas cercanas al Sol se representan con relación a la clase espectral. Muestra que existe una relación entre el brillo real y la clase espectral.

diagrama de mariposa
Diagrama concebido originalmente por el astrónomo inglés E. Walter Maunder en 1904. Muestra las variaciones en la latitud solar de las manchas solares durante cada ciclo de manchas de 11 años de duración. Las manchas aparecen en primer lugar en latitudes situadas en torno a los 35 grados norte y sur del ecuador solar, y posteriormente se desplazan a altitudes inferiores a la vez que se incrementa su número. A medida que el

ciclo avanza, se van haciendo cada vez más escasas y acercándose más y más al ecuador. El diagrama muestra un dibujo que recuerda las alas de una mariposa.

difracción
Combamiento aparente de la luz, la radiación y otras longitudes de onda en torno a los bordes de un objeto. La naturaleza de onda de la radiación produce la aparición de franjas brillantes y oscuras.



dilatación del tiempo
Aminoramiento del paso del tiempo en un cuerpo que se mueve con respecto al observador.

disco de acreción
Disco de materia situada en órbita alrededor de un cuerpo celeste —tal como un agujero negro— al que cae continuamente materia que posteriormente será atraída hacia el cuerpo o hacia el agujero.

división de Cassini
Principal división de los anillos de Saturno, visible a través de los telescopios terrestres.

división de Encke
División estrecha de los anillos de Saturno. Es más una «ondulación» que una separación amplia.

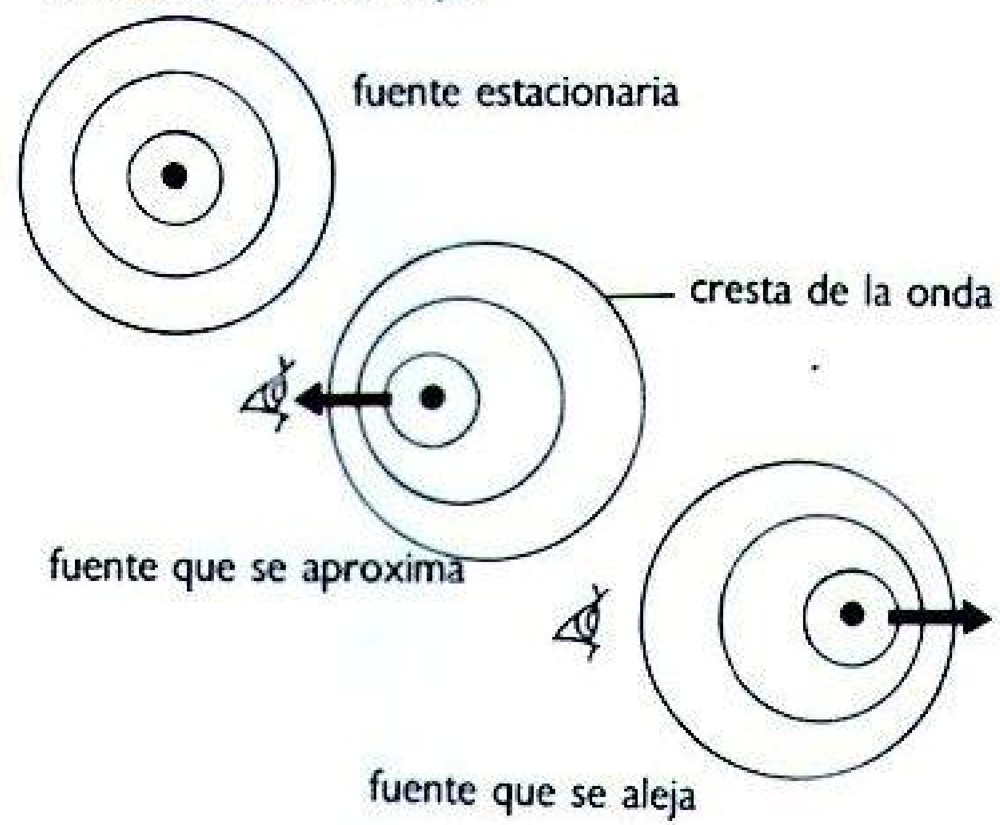


eclipses y ocultamientos
Los eclipses se producen cuando un cuerpo celeste atraviesa la sombra de otro, como sucede cuando la Luna atraviesa la sombra de la Tierra. Los eclipses de los satélites de Júpiter también pueden observarse desde la Tierra.

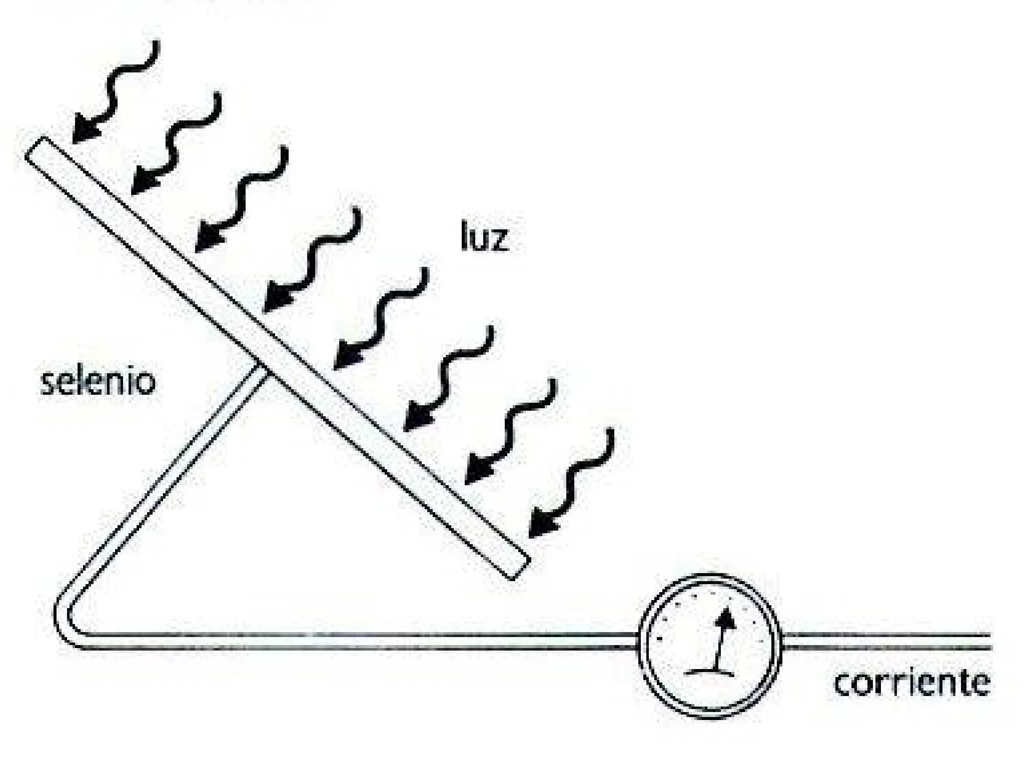
Un eclipse de Sol es, de hecho, un ocultamiento (un cuerpo que pasa frente a otro), si bien en astronomía este último término suele reservarse para el oscurecimiento de una estrella o un planeta por un asteroide o satélite (por ejemplo, la Luna).

efecto de anillo de diamante
Efecto visual que se observa durante los eclipses solares totales cuando el disco del Sol comienza a reaparecer tras la Luna, adoptando la forma de un anillo con un diamante.

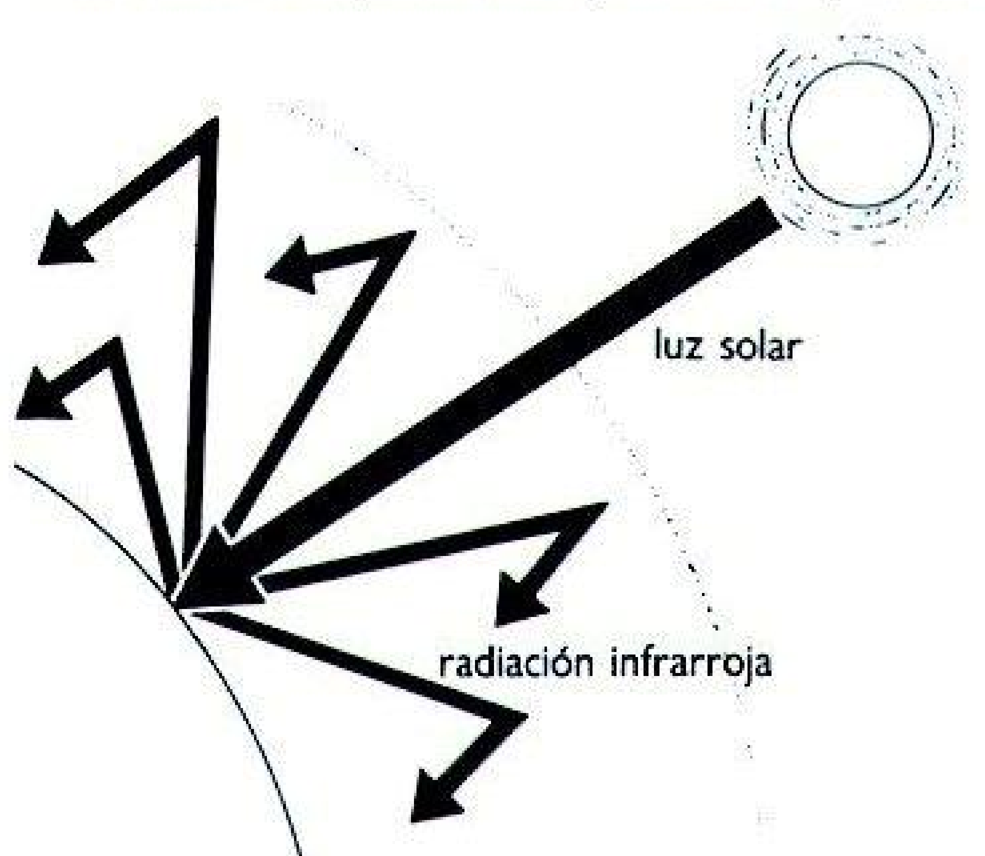
efecto Doppler
En astronomía, el corrimiento de las líneas de un espectro hacia el rojo o el azul debido al movimiento de la fuente que emite el espectro. Si la fuente se desplaza hacia nosotros, la frecuencia con que nos llegan las crestas de sus ondas aumentará, lo que producirá una reducción aparente en la longitud de onda y un corrimiento de las líneas del espectro hacia el azul. Si el objeto se aleja, el efecto que percibimos es una mayor longitud de onda, lo que produce un corrimiento de las líneas hacia el rojo.



efecto fotoeléctrico
Emisión de electrones por parte de ciertos metales tales como el selenio al ser expuestos a radiaciones electromagnéticas. El número de electrones emitidos depende de la intensidad de la radiación recibida y de su velocidad en la frecuencia de radiación. Esto llevó a Albert Einstein a proponer en 1905 que la luz y el resto de las radiaciones electromagnéticas consistían en partículas dotadas de un comportamiento similar al de las ondas. Ello constituyó uno de los pilares de la teoría cuántica.

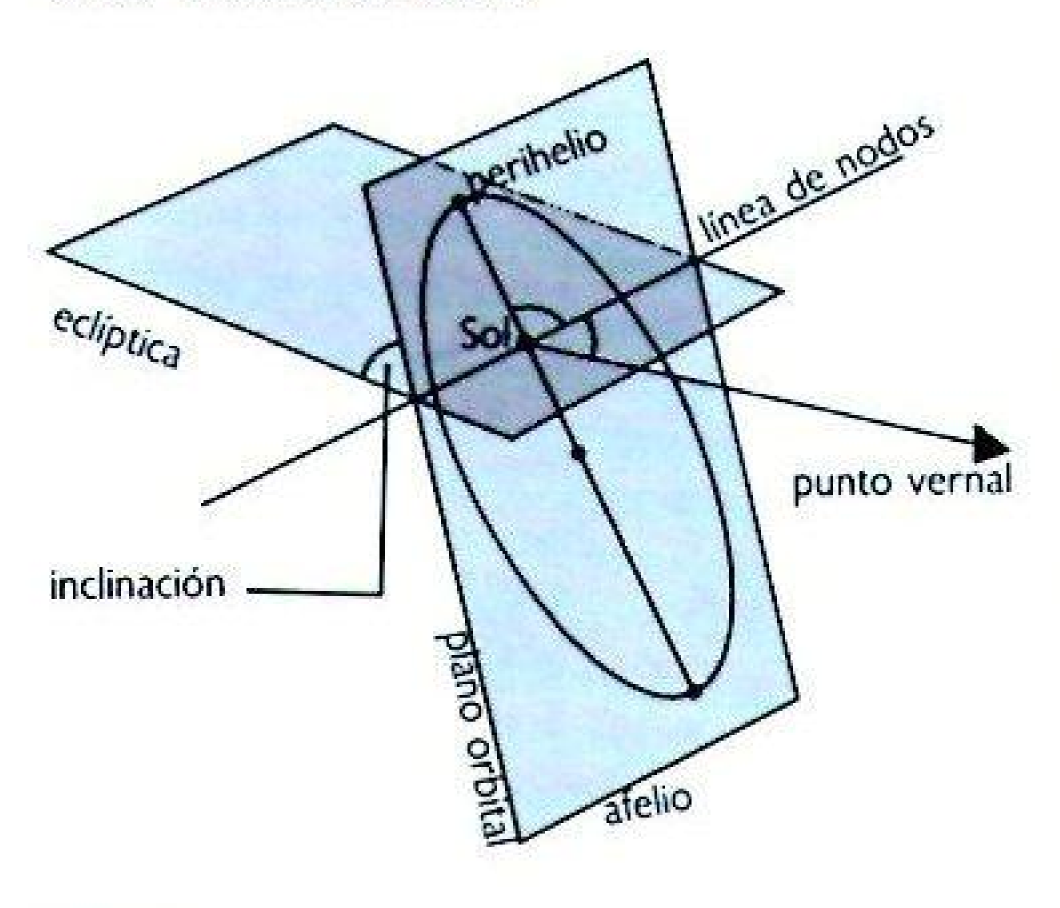


efecto invernadero
Absorción de la radiación infrarroja saliente por una atmósfera planetaria y reemisión de la misma sobre la superficie del planeta, lo que contribuye a incrementar la temperatura media de la misma. Es el responsable de la elevadísima temperatura (737K) de Venus.



electrón
Partícula fundamental y estable de la clase conocida como leptones. Posee una carga eléctrica negativa, un spin de $^1/_2$ y una masa de $9,1 \times 10^{-28}$ g. Su antipartícula es el positrón, dotado de una carga eléctrica positiva.

elementos orbitales
Dícese de los diversos parámetros que describen las características de una órbita. La inclinación es el ángulo que forma con la eclíptica (o plano de la órbita de la Tierra). La orientación es definida por el ángulo entre la línea de los nodos (allí donde el plano de la órbita atraviesa la eclíptica) y la dirección de una posición denominada punto vernal. Las distancias entre el Sol y su perihelio* y afelio* definen su forma.



elipse
Curva cerrada y alargada descrita por los planetas, asteroides, cometas y satélites.

elongación
Distancia angular, al este o al oeste, entre el Sol y Mercurio o Venus.

enana blanca
Estado de superdensidad al que termina por llegar una estrella de no más de 1,4 veces la masa del Sol y en el que la mayor parte de su materia entra en un estado degenerativo.

enana marrón
Estrella dotada de una masa tan pequeña —menos de 0,08 veces la del Sol— que en su interior no pueden producirse reacciones termonucleares. Dichas estrellas poseen un ligero brillo debido a que la fuerza de la gravedad las obliga a contraerse, despidiendo energía al mismo tiempo.

enana roja
Estrella rojiza y débil situada al final de su secuencia principal* y dotada de una temperatura superficial de entre 2.500 y 5.000K.

entropía
Cantidad que, junto con la energía total, descri-

be el estado termodinámico de un sistema físico. Es una medida del número de modos en que las posiciones y velocidades de las moléculas pueden disponerse obteniéndose las mismas propiedades macroscópicas. Abandonado a su propia evolución, cualquier sistema tiende a maximizar el número de disposiciones equivalentes, esto es: la entropía aumenta al máximo. (Cuando ya no puede producirse un incremento adicional, se dice que se ha alcanzado el equilibrio.)

Dado que, dicho de un modo aproximado, un sistema desordenado es aquel cuyos elementos pueden «barajarse» sin que se produzcan cambios significativos, la entropía se considera en ocasiones como la medida del desorden.

En un espacio amplio existen más modos de disponer las moléculas de un gas que en un espacio pequeño; en consecuencia, éstas incrementan su entropía diseminando la energía equitativamente en todo el recipiente, de modo que cualquier desigualdad inicial que hubiera habido en la temperatura acaba desapareciendo.

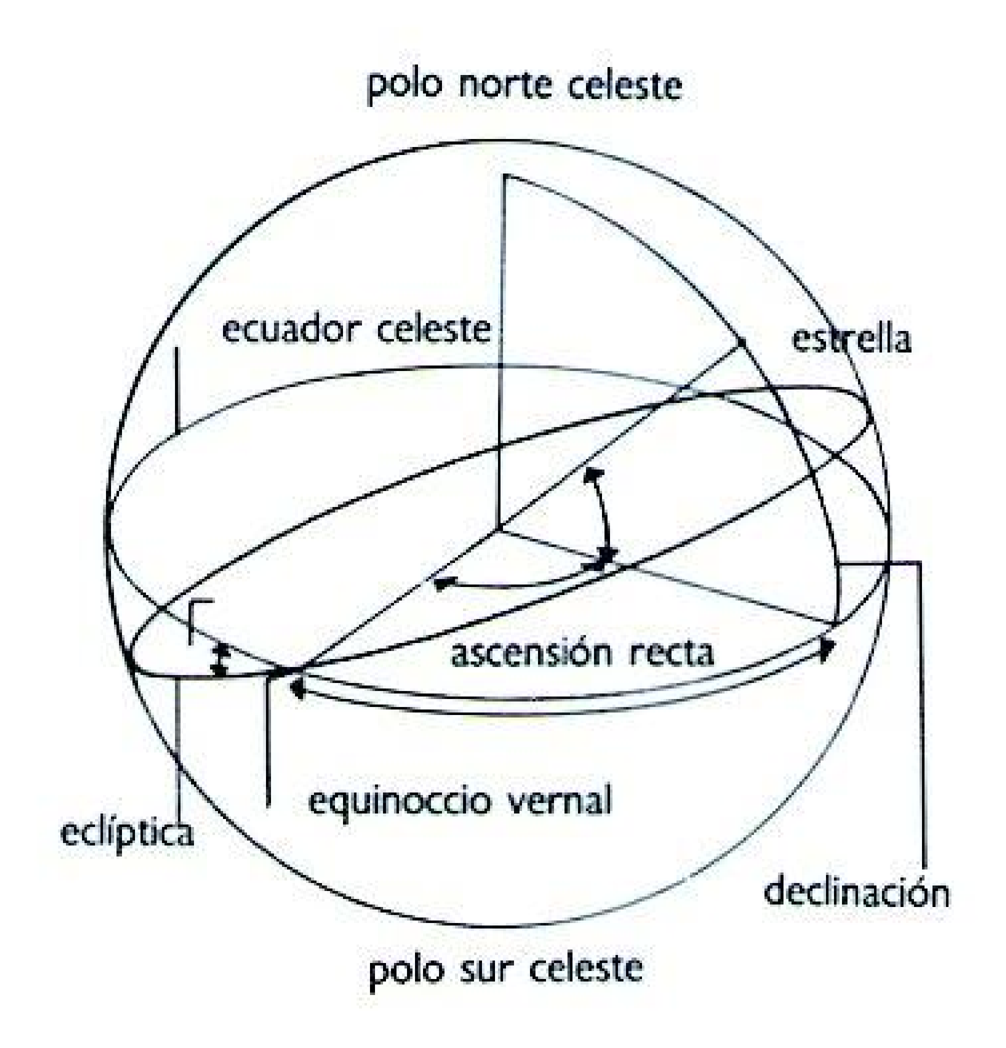
Las variaciones de densidad o temperatura siempre pueden utilizarse para obtener una energía útil. Así, en un sistema dotado de una energía total dada, puede utilizarse una mayor cantidad de la misma cuando la entropía es más baja.

era del desacoplamiento
Período de 300.000 años posterior al *Big Bang,* durante el cual la radiación dejó de ser dispersada por la materia y se volvió independiente de ésta. Ello se debió a que la temperatura había descendido a unos 3.000 K, permitiendo así que los protones y electrones formaran átomos de hidrógeno, que son transparentes a la radiación.

erupción solar
Súbita descarga de energía visible en forma de luz brillante sobre la superficie del Sol. Las erupciones duran apenas unos minutos y tienen lugar sobre las regiones activas de la fotosfera, bien en la cromosfera*, bien en la región inferior de la corona. Las erupciones se caracterizan no sólo por su imagen visible, sino también por su emisión de ondas de radio, rayos X y, en ocasiones, rayos gamma.

escala Kelvin de temperatura
Escala de temperatura cuyas unidades (llamadas kelvins y simbolizadas por una K) son equivalentes a las de la escala Celsius. El cero se halla fijado en -273,16 °C, y se conoce a menudo como «cero absoluto».

esfera celeste
Esfera imaginaria sobre la que se representan los cuerpos celestes. Constituye un método sumamente útil para definir sus posiciones. Los equivalentes celestes de la longitud y la latitud terrestres son la **ascensión recta** y la **declinación**, y se hallan basados en el ecuador celeste. **La latitud y longitud celestes** no se hallan basadas en el ecuador celeste, sino en la eclíptica o trayectoria aparente del Sol en el firmamento. La **altitud*** y el **acimut*** son coordenadas basadas en la Tierra. Todas las coordenadas se miden en grados a excepción de la ascensión recta (AR), la cual se mide en horas, minutos y segundos. Veinticuatro horas de ascensión recta equivalen a 360 grados, por lo que una hora equivale a 15 grados. Un minuto de AR equivale a 15 minutos de arco; un segundo de AR equivale a 15 segundos de arco.



espacio-tiempo
Combinación de las tres dimensiones del espacio y una de tiempo que permite describir los acontecimientos matemáticamente por medio de cuatro coordenadas.

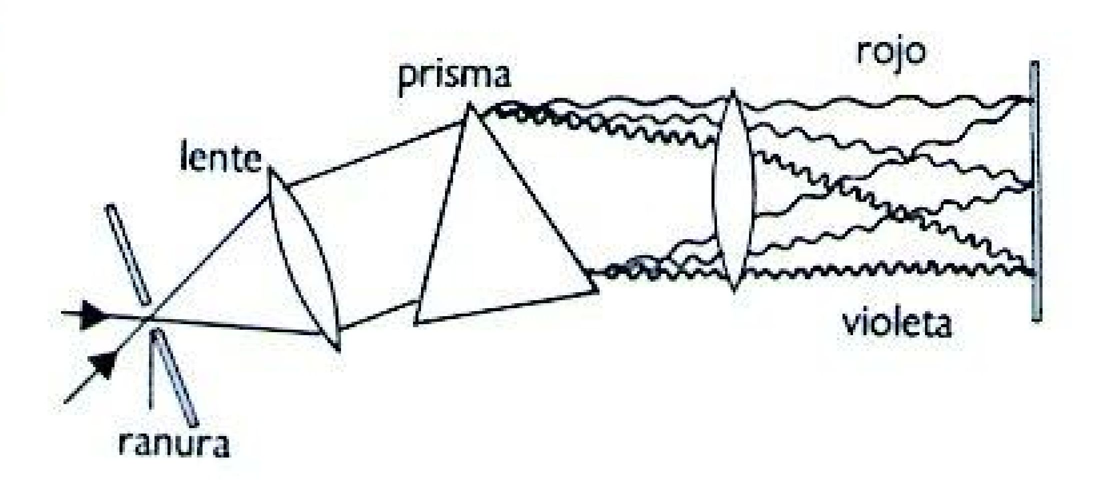
espectro
Franja de radiación que comprende diferentes longitudes de onda. El espectro óptico abarca desde el violeta al rojo oscuro, y sus longitudes de onda oscilan entre 380 y 750 millonésimas de milímetro.

espectro de absorción
Espectro brillante atravesado por líneas oscuras debidas a la presencia de vapores fríos de elementos químicos específicos entre el observador y la fuente de calor que arroja el espectro. A partir de él pueden determinarse los elementos químicos que integran las capas exteriores de las estrellas.

espectro continuo
Visualmente, es una franja continua de colores que oscilan entre el rojo y el violeta, emitida por un cuerpo sólido incandescente o por uno cuya materia se halla densamente agrupada, como es el caso de las estrellas. En ambos extremos, el espectro se extiende hacia las longitudes de onda no visuales. (*Véase* espectro de absorción y espectro de emisión.)

espectro de emisión
Espectro despedido por un gas incandescente, tal como una nebulosa de emisión. Se caracteriza por hallarse formado por líneas brillantes sobre un fondo oscuro debido a que el gas incandescente irradia sólo en longitudes de onda específicas que dependen de los elementos químicos de que se componen.

espectroscopio
Instrumento diseñado para producir la imagen óptica de un espectro y de sus líneas espectrales*.



espiral barrada
Galaxia espiral en la que la región central aparece como una barra de materia en lugar de como un abultamiento o esfera redondeados.

estrella
Cuerpo celeste emisor de radiaciones propias en el que la energía se genera en las regiones centrales por medio de reacciones termonucleares.

estrella binaria
Pareja de estrellas situadas en órbita la una en torno a la otra.

estrella circumpolar
Cualesquiera de las estrellas situadas permanentemente por encima del horizonte observador, por lo que no tienen orto ni ocaso.

estrella doble
Dícese de las estrellas que parecen formar una pareja debido a su proximidad en nuestra línea de visión.

estrella gigante
Estrellas muy luminosas y dotadas a menudo de un gran diámetro en comparación con otras de la misma clase espectral. En contrapartida, poseen una atmósfera mucho más tenue.

estrella múltiple
Estrella formada por tres o más componentes situados mutuamente en órbita en torno al centro de masa del conjunto.

estrella de neutrones
Estrella masiva situada en las últimas etapas de su vida. Su material, ya degenerado, se compone de neutrones fuertemente apretados. Poseen un diámetro de unos 20 km y una masa inmensa, ya que su densidad es 10^{15} veces (mil billones) la del agua. Cuando se hallan magnetizadas y rotan emiten pulsaciones de radiación y se conocen como púlsares. En las estrellas binarias de rayos X, uno de los componentes es una estrella de neutrones, y los rayos X son emitidos a medida que dichos cuerpos masivos atraen la materia.

estrella variable
Estrella cuya luminosidad aparente cambia de intensidad. Puede deberse a variaciones en la emisión de energía de la estrella o a que ésta forme parte de un sistema binario en el que cada com-

ponente eclipsa alternativamente al otro. Esta última disposición se conoce con el nombre de binaria eclipsante.

estrellas RR Lyrae
Gigantes rojas muy viejas que se han convertido en variables cuya variación luminosa es causada por pulsaciones, tal y como ocurre en el caso de las variables Cefeidas*. Casi todas varían con período entre 9 y 17 horas, aunque algunas llegan a tardar unas 29 horas. La mayoría sitúa su período en torno a 13 horas. Su magnitud absoluta general es de aproximadamente +0,5. Se trata de un grupo numeroso; se conocen más de 2.000, la mitad de las cuales se halla situada en cúmulos globulares*. Han sido bautizadas en honor de la estrella RR Lira, si bien no fue ésta la primera en descubrirse. Al igual que las Cefeidas, estas estrellas resultan de gran importancia a la hora de determinar las distancias espaciales.

estrellas supergigantes
Estrellas gigantes rojas de mayor brillo y tamaño que sus compañeras. Se incluyen estrellas de magnitud absoluta de entre -5 y -8, esto es, estrellas al menos 8.000 veces más brillantes que el Sol.

estrellas T-Tauri
Estrellas muy jóvenes y de rotación rápida, situadas probablemente en las últimas etapas de su vida como protoestrella antes de incorporarse a la secuencia principal. T Tauri constituye el prototipo de todas ellas. Menos masivas que el Sol, poseen atmósferas gaseosas extensas y activas.

estrellas de Wolf-Rayet
Estrellas cuyas líneas espectrales son todas brillantes y, por tanto, líneas de emisión, careciendo de las habituales líneas oscuras de absorción. Se trata de estrellas brillantes sumamente calientes cuya temperatura superficial oscila entre los 25.000 y 50.000 K; son entre 100.000 y un millón de veces más brillantes que el Sol, y entre 10 y 50 veces más masivas que éste.

excentricidad
Medida de la desviación de una elipse con respecto al círculo. En una órbita circular, la excentricidad es cero, mientras que su valor máximo es siempre inferior a 10.



fáculas
Zonas brillantes y activas de las capas superiores de la fotosfera solar, situadas a menudo en las proximidades de las manchas solares.

falso vacío
Estado cuántico de vacío caracterizado por una potente fuerza de repulsión. Se mantuvo activo durante el período de inflación del *Big Bang*.

ferminón
Clase de partículas atómicas dotadas de un spin no entero. Entre ellos se incluyen los protones, neutrones y electrones.

foco acodado
Foco de un telescopio en el que la luz se extrae de tal modo que el foco siempre permanece estacionario.

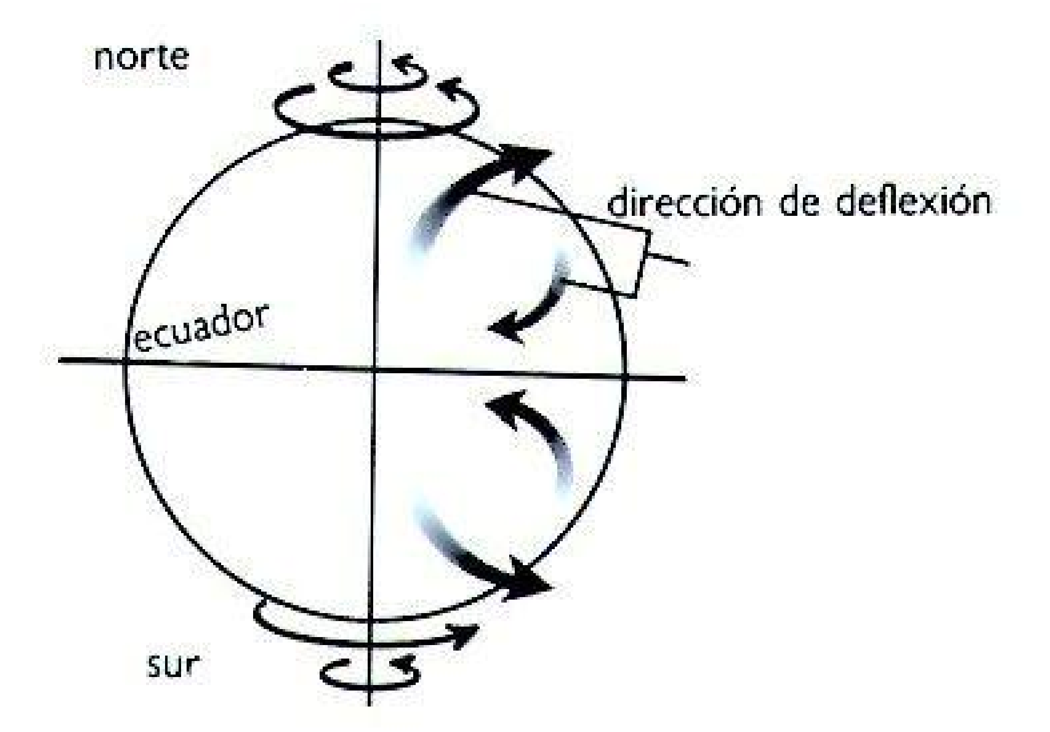
foco primario
«Primer» foco de un telescopio, antes de que la radiación haya atravesado reflectores o lentes secundarios. En los reflectores ópticos se halla situado en la parte superior del tubo del telescopio; en los refractores, en el ocular del tubo.

fotón
Partícula cuántica de luz, a la vez que partícula mensajera de la radiación electromagnética.

fotosfera
La «superficie» o disco aparente del Sol, a la vez que fuente del espectro de absorción del mismo. Su temperatura es de unos 6.000 K.

frecuencia
Número de veces por segundo que las crestas o senos de las ondas de radiación electromagnética alcanzan al observador. La frecuencia se obtiene dividiendo la velocidad de la luz por la longitud de onda de la radiación.

fuerza de Coriolis
Desviación de un cuerpo en movimiento sobre la superficie de la Tierra, causada por la rotación de la misma. En el hemisferio norte, produce una circulación de aire en el sentido de las manecillas del reloj en torno a áreas de altas presiones y en sentido contrario a las manecillas del reloj en torno a áreas de bajas presiones. Muestra el efecto contrario en el hemisferio sur.



fuerza nuclear débil
Fuerza nuclear que interviene en la radioactividad* y en algunas reacciones de los neutrinos. Es 100.000 veces más débil que la fuerza nuclear fuerte y opera a lo largo de una distancia de menos de 10^{-14} mm.

fuerza nuclear fuerte
Fuerza que mantiene unidos a los quarks*. Se piensa que opera por medio de partículas mensajeras llamadas gluones.



galaxia
Acumulación celeste de estrellas, polvo y gas.

galaxia elíptica
Galaxia de forma elipsoide compuesta fundamentalmente por estrellas sin apenas gas ni polvo.

galaxia espiral
Galaxia dotada de un abultamiento central y brazos espirales extendidos a lo largo de su plano ecuatorial. Se compone de polvo, gas y estrellas.

galaxia irregular
Galaxia de forma demasiado irregular para poder ser clasificada como espiral*, elíptica* o lenticular*.

galaxia lenticular
Galaxia de forma intermedia entre las galaxias elípticas* y las galaxias espirales*.

galaxia de Markarian
Galaxias brillantes que irradian con más fuerza en el extremo azul del espectro. Fueron catalogadas por el astrónomo soviético B.E. Markarian durante la década de 1970.

galaxia de Seyfert
Galaxia espiral o barrada dotada de una región central intensamente brillante. Su radiación cubre todas las longitudes de onda, lo que no se considera como una característica permanente, sino como una etapa de su desarrollo. Muestran algunas similitudes como los quasars*.

gigantes azules
Estrellas muy calientes y luminosas cuya radiación es más intensa en las longitudes de onda corta que en las largas. Despiden gran cantidad de energía y son muy brillantes; poseen una esperanza de vida relativamente corta que suele medirse en millones de años en lugar de en miles de millones. La temperatura de su superficie es entre 20.000 y 30.000 veces superior a la del Sol, y son unas 100.000 veces más luminosas.

gigantes rojas y supergigantes
Estrellas rojizas y brillantes de gran tamaño —poseen entre 10 y 100 veces el diámetro del Sol— situadas en la parte superior derecha del diagrama de Hertzsprung-Russell*.

glóbulos de Bok
Pequeños remansos o glóbulos de materia observados en nebulosas brillantes o frente a un fondo de estrellas brillantes. Se piensa que constan de materia protoestelar en proceso de contracción para la formación de una estrella. Su diámetro se ha calculado entre unas 10.000 y 25.000 veces la distancia que separa la Tierra del Sol.

gluón
Partícula mensajera que mantiene unidos a los

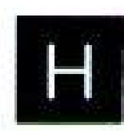
quarks, los cuales son, a su vez, las partículas básicas del núcleo atómico.

Gran Mancha Roja
La gran zona ovalada y rojiza que se observa en la capa superior de nubes de la atmósfera de Júpiter. Gira en sentido contrario a las manecillas del reloj.

grandes teorías unificadas (GUT)
Teoría que busca unificar las fuerzas básicas de la naturaleza, agrupando en un mismo esquema la gravitación, el electromagnetismo y las fuerzas nucleares fuerte y débil. Dichas fuerzas eran indistinguibles entre sí a las temperaturas extraordinariamente altas que reinaban en los primeros momentos del *Big Bang*.

gravitón
Partícula mensajera de la gravedad en las teorías de la gravitación cuántica.

Grupo Local
Cúmulo de galaxias de la que la nuestra es miembro. Incluye asimismo las Nubes de Magallanes, y cubre un radio de espacio de unos 2,5 millones de años luz.



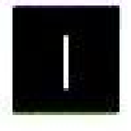
H

hadrón
Partícula subatómica fundamental sometida a la fuerza nuclear fuerte*. Entre los hadrones se incluyen los protones, neutrones y mesones, y constan de parejas o tríos de quarks.

halo
Anillo brillante perceptible alrededor de los cuerpos celestes. Los halos observados en torno al Sol y la Luna se deben a la refracción y reflexión de su luz por la atmósfera terrestre. También se utiliza este término para describir la materia repartida esféricamente en torno a nuestra galaxia.

horizonte de distancia
Distancia máxima que puede haber recorrido la luz desde el origen del universo.

horizonte de suceso
Límite de un agujero negro, dentro del cual no puede observarse suceso alguno desde el universo exterior.



I

inercia
Tendencia de un cuerpo a resistir cambios en su velocidad, tanto si se trata de aceleración como de deceleración. Se halla implícita en las leyes newtonianas del movimiento, según las cuales un cuerpo se mantendrá en estado de movimiento uniforme a lo largo de una línea recta a no ser que se vea sometido a fuerzas extensas. La aceleración que una fuerza dada puede producir en un cuerpo, depende de la masa de éste, denominada a menudo masa inercial.

interferencia
(1) En tecnología de radio, de gradación de las señales de radio por otras señales o por turbulencias. Para evitarla, las señales de las naves espaciales se transmiten digitalmente. (2) En física, superposición de una onda sobre otra. La onda resultante, causada por las ondas anteriores que se refuerzan o debilitan mutuamente, se conoce como patrón de interferencia. Ópticamente, dicha interferencia posee el aspecto de una serie de franjas claras y oscuras alternadas.

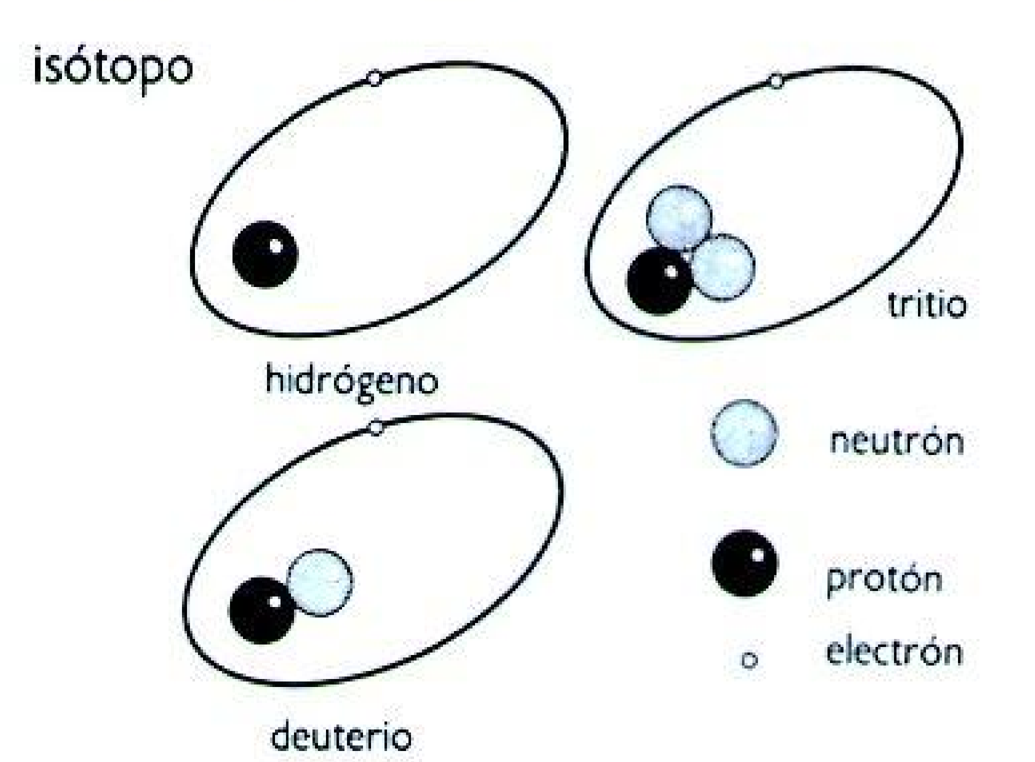
interferometría
Observaciones realizadas sirviéndose de las interferencias de ondas de luz o de radio. En astronomía, la técnica se aplicó ópticamente por vez primera en la década de los veinte por el físico norteamericano Albert Michelson para medir los diámetros de las estrellas grandes más cercanas.

interferometría estelar
Técnica diseñada para mejorar el poder de resolución de los telescopios por medio de numerosas exposiciones de milisegundos de duración de cuerpos celestes que tienen por objeto «congelar» la turbulencia de la atmósfera terrestre. La combinación posterior de estas imágenes muestra un patrón determinado de interferencia, y su análisis permite la formación de imágenes compuestas.

ion
Un ion es un átomo o molécula que o bien ha perdido uno o más de sus electrones —y, por ello, posee una carga eléctrica positiva— o bien ha ganado uno o más electrones. En este último caso, el ion poseerá carga eléctrica negativa.

ionosfera
Zona de la atmósfera terrestre que se extiende entre unos 60 y 500 km sobre la superficie del planeta. Es en ella donde se ionizan la mayor parte de los átomos y moléculas por efecto de la radiación solar. Así electrificada, la ionosfera actúa a modo de espejo en el ciclo para las ondas de radio largas, medias y algunas longitudes cortas, permitiendo las comunicaciones por radio de un lado al otro del planeta sin ayuda de satélite. No obstante, las tormentas magnéticas solares afectan a la ionosfera y causan silencios que perturban tales comunicaciones.

isótopo



Forma de un elemento en la que el núcleo atómico posee su número característico de protones pero contiene un número de neutrones diferente del elemento en su forma habitual. Químicamente, los isótopos no se diferencian de las formas ordinarias de sus respectivos elementos, pero su comportamiento puede diferir en otros aspectos. El tritio, por ejemplo —una forma de hidrógeno dotada de dos neutrones en el núcleo junto al protón del hidrógeno ordinario—, es radioactivo.



L

lagunas de Kirkwood
Regiones del cinturón de asteroides que se extiende entre Marte y Júpiter en las que apenas se producen órbitas de asteroides debido al efecto gravitatorio de Júpiter. Fueron descubiertas en 1857 por el matemático norteamericano Daniel Kirkwood.

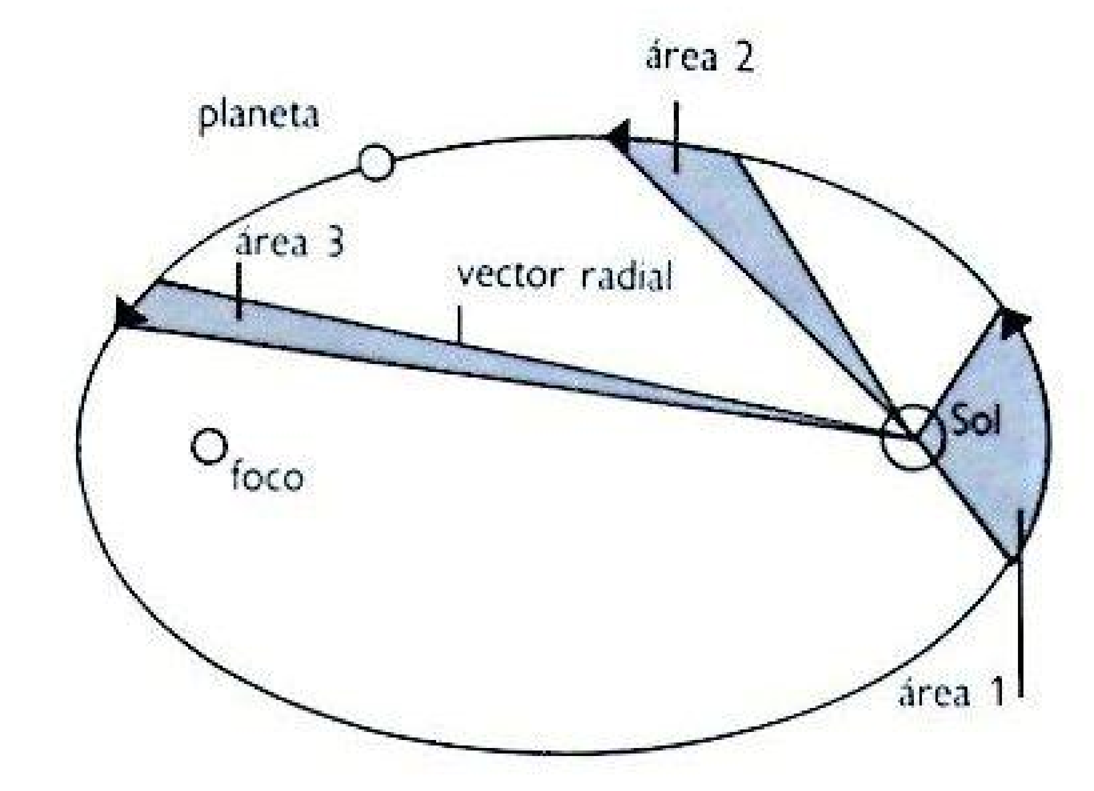
lente gravitatoria
Debido al hecho de que los cuerpos fuerzan la curvatura del espacio-tiempo, un cuerpo lo bastante masivo puede desviar la luz y otras radiaciones procedentes de un objeto más distante, de tal modo que resulte visible para un observador terrestre aunque de otro modo hubiera permanecido oculto. Es como si el objeto masivo, más cercano, actuara a modo de lente. Este efecto puede también producir la aparición de imágenes distorsionadas o múltiples de objetos distantes.

leptones
Partículas no afectadas por la fuerza nuclear fuerte. Las conocidas hasta el momento son el electrón, el muón, el neutrino y la partícula tau.

Ley de Titius-Bode
Relación aritmética concebida originalmente en 1766 por el físico alemán Johannn Titius o Tietz y difundida por el astrónomo alemán Johann Bode en 1772.

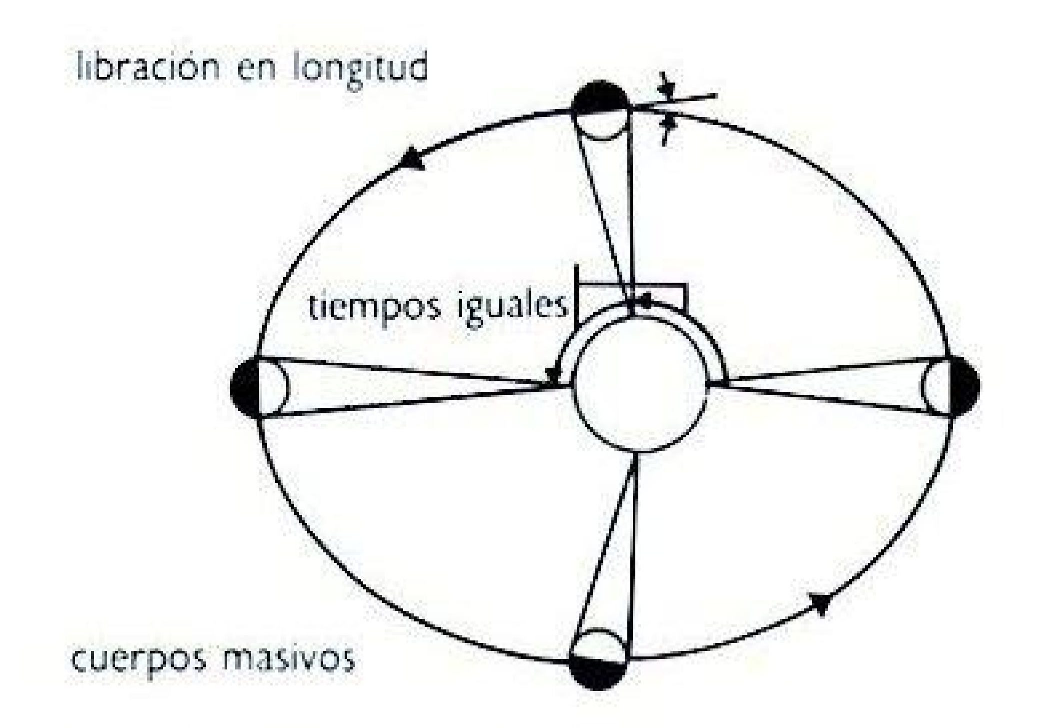
Si se añade 4 a cada número de la secuencia 0, 3, 6, 12, 24, 48, 96, se obtiene la secuencia 4, 7, 10, 16, 28, 52, 100. Si se da el valor de 10 a la distancia que separa la Tierra del Sol, el resto de los números se corresponden estrechamente con las distancias entre el Sol y el resto de los planetas mayores hasta llegar a Saturno. Se descubrió que la secuencia continuada resultaba válida tras descubrirse la existencia de Urano, pero se rompe al llegar a Neptuno y Plutón. Condujo al reconocimiento de la distancia que separa a Marte de Júpiter (equivalente al número 28 de la secuencia) y, con ello, al descubrimiento de los asteroides.

leyes de Kepler
Las tres leyes que gobiernan el movimiento orbital de los planetas. Son las siguientes: (1) los planetas se mueven en órbitas elípticas, con el Sol situado en uno de los focos de la elipse; (2) el vec-



tor radial (línea que une el Sol con el planeta) recorre áreas iguales de espacio (zonas 1, 2, 3 del diagrama) en tiempos iguales, proporcionando así a los planetas mayor velocidad cuanto más próximos se hallan al Sol; (3) los cuadrados de los tiempos de las revoluciones siderales de los planetas son proporcionales a los cubos de los semiejes mayores de sus órbitas.

libración
Oscilaciones de los movimientos de la Luna que muestran una pequeña parte de su cara oculta. Por ejemplo, las variaciones de la velocidad orbital, combinadas con la constancia de la velocidad rotacional, producen una libración «en longitud» (este-oeste). Como resultado, desde la Tierra puede contemplarse aproximadamente un 59 por ciento de la superficie lunar.



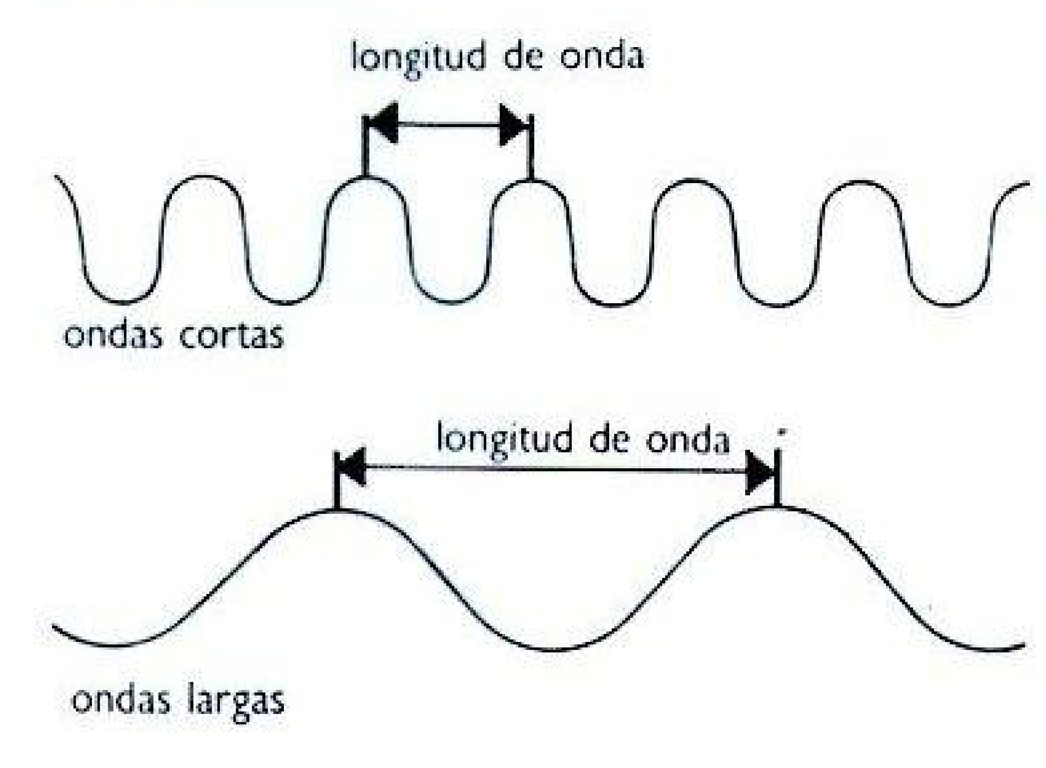
límite de Chandrasekhar
La masa límite de una estrella para que se convierta en enana blanca. Dicha masa es 1,44 veces la del Sol. Las estrellas aún más masivas se convertirán en estrellas de neutrones o en agujeros negros.

límite de Roche
La distancia menor a la que un satélite puede situarse en órbita en torno a un planeta. A menores distancias, las fuerzas gravitatorias lo desintegrarían.

línea espectral
Línea brillante u oscura del espectro de un cuerpo emisor de radiación.

líneas de Fraunhofer
Líneas oscuras de absorción que atraviesan el espectro continuo y brillante del Sol. Así llamadas porque sus posiciones fueron cuidadosamente anotadas por primera vez por el óptico y astrónomo alemán Joseph Fraunhofer en 1814.

longitud de onda
Distancia entre las sucesivas crestas o senos de una onda, especialmente en lo que se refiere a la radiación electromagnética. Se halla relacionada con la frecuencia*.



luz zodiacal
Débil resplandor que en condiciones óptimas es posible observar al oeste justamente después de la puesta del sol y al este justamente antes del alba. Se debe al reflejo de la luz solar en un cinturón de polvo situado en el plano del sistema solar.



magnetosfera
Zona situada en torno a un planeta en la que las partículas ionizadas se hallan bajo la influencia del campo magnético del planeta. Su borde se conoce con el nombre de magnetopausa.

magnitud
En astronomía, término utilizado para especificar el brillo de un cuerpo celeste. Se basa en el modo en que el ojo y el cerebro humanos estiman el brillo. Una diferencia de una magnitud representa 2.512 veces más o menos brillo. Las magnitudes se miden según una escala ascendente de debilidad, de tal modo que una estrella de magnitud 2 es 2.512 veces menos brillante que una de magnitud 1. La escala se extiende hasta abarcar valores negativos. (La magnitud cero es 2.512 veces menos brillante que la magnitud –1.)

Magnitud absoluta es la que mostraría un cuerpo celeste situado a una distancia de 32,6 años luz (10 parsecs). Permite la comparación directa del brillo de los diferentes cuerpos.

Magnitud aparente es la que parece poseer un cuerpo celeste para un observador situado en la Tierra. No sólo depende del brillo real de la estrella, sino también de su distancia.

Magnitud bolométrica es la que considera la radiación en todas las longitudes de onda, y no sólo en las visibles.

Magnitud fotográfica es la medida con placas fotográficas tradicionales especialmente preparadas para uso astronómico. En ellas, la mayor sensibilidad se encuentra en la zona azul del espectro.

Magnitud fotovisual es la magnitud medida a partir de una placa fotográfica con el empleo de filtros destinados a obtener una respuesta similar a la del ojo humano.

manchas solares
Manchas oscuras visibles sobre la fotosfera del Sol. Cada mancha consta de una zona central oscura o umbra y una región ligeramente más brillante que la rodea denominada penumbra. Se hallan causadas por los campos magnéticos del Sol, e indican áreas más frías que las zonas que las rodean. Su tamaño puede variar entre dimensiones infinitesimales y áreas de varios miles de millones de kilómetros cuadrados. Su oscuridad aparente se debe al contraste con el brillo de la fotosfera. Su número varía a lo largo de ciclos de 11 años de duración.

mascon
Abreviatura inglesa de «concentración de masa». Se utiliza para hacer referencia a las concentraciones de masa más densas situadas bajo la superficie de algunas llanuras lunares o «mares»; fueron localizadas por las naves *Apolo* durante su órbita.

materia oscura
Materia no visible por medios ópticos ni tampoco en otras longitudes de onda. De existir realmente, se sumaría al resto de la masa del universo y podría bastar para frenar su expansión y provocar una contracción.

meridiano
Círculo imaginario de la esfera celeste* que pasa a través de los polos celestes y el cenit*. Forma una intersección con el horizonte en dos puntos situados al norte y al sur del observador.

mesón
Partícula compuesta por un quark* y un antiquark.

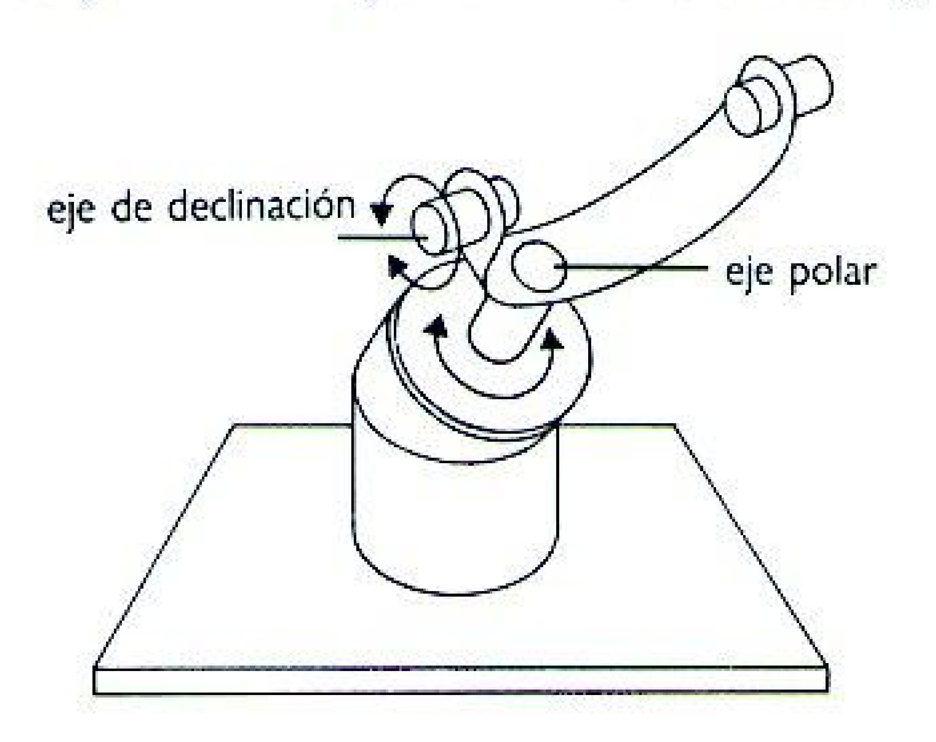
meteoritos
Trozos de material rocoso, metálico o carbonáceo y de un tamaño frecuentemente no superior a una partícula de polvo, que caen sobre la Tierra. Los meteoritos entran en combustión debido a la fricción con la atmósfera terrestre a altitudes de entre 70 y 115 km. Su velocidad es generalmente de entre 11 y 74 km/s. Pueden distinguirse en el firmamento como brillantes franjas de luz que duran una fracción de segundo.

molécula
La unidad más pequeña de una sustancia capaz de retener su composición y sus propiedades químicas. Puede constar de un único átomo o de un conjunto de ellos.

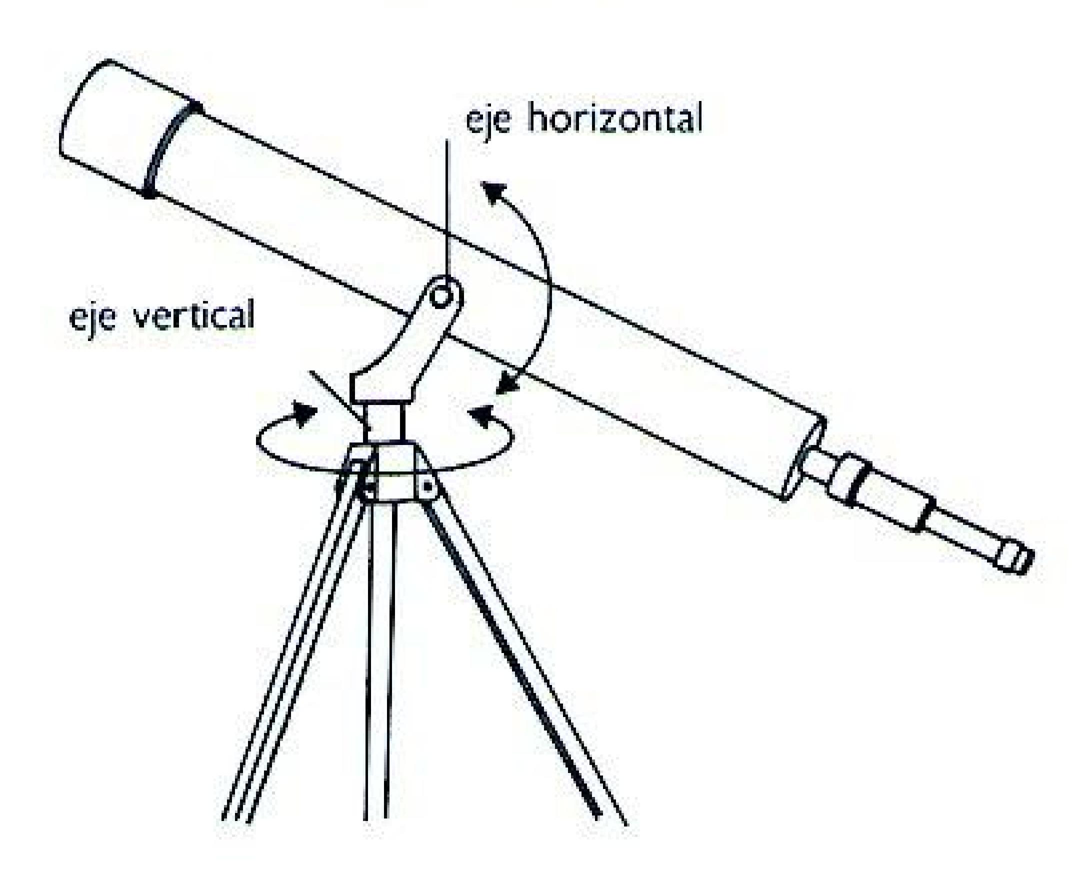
monopolo magnético
Polo magnético individual independiente. Los monopolos no existen en el mundo cotidiano de-

bido a que los imanes siempre poseen dos polos, pero su existencia fue predicha por el físico inglés Paul Dirac en 1931. Si bien no se ha observado ninguno, pudieron haber existido en las primeras etapas del *Big Bang*.

montura ecuatorial
Montura de telescopio en la que uno de los ejes es paralelo al eje polar de la Tierra. El otro eje de rotación del telescopio se halla situado en ángulo recto con el eje polar. Esta disposición permite al observador seguir el recorrido curvo de un cuerpo celeste a través del firmamento haciendo girar el telescopio sobre uno sólo de sus ejes.

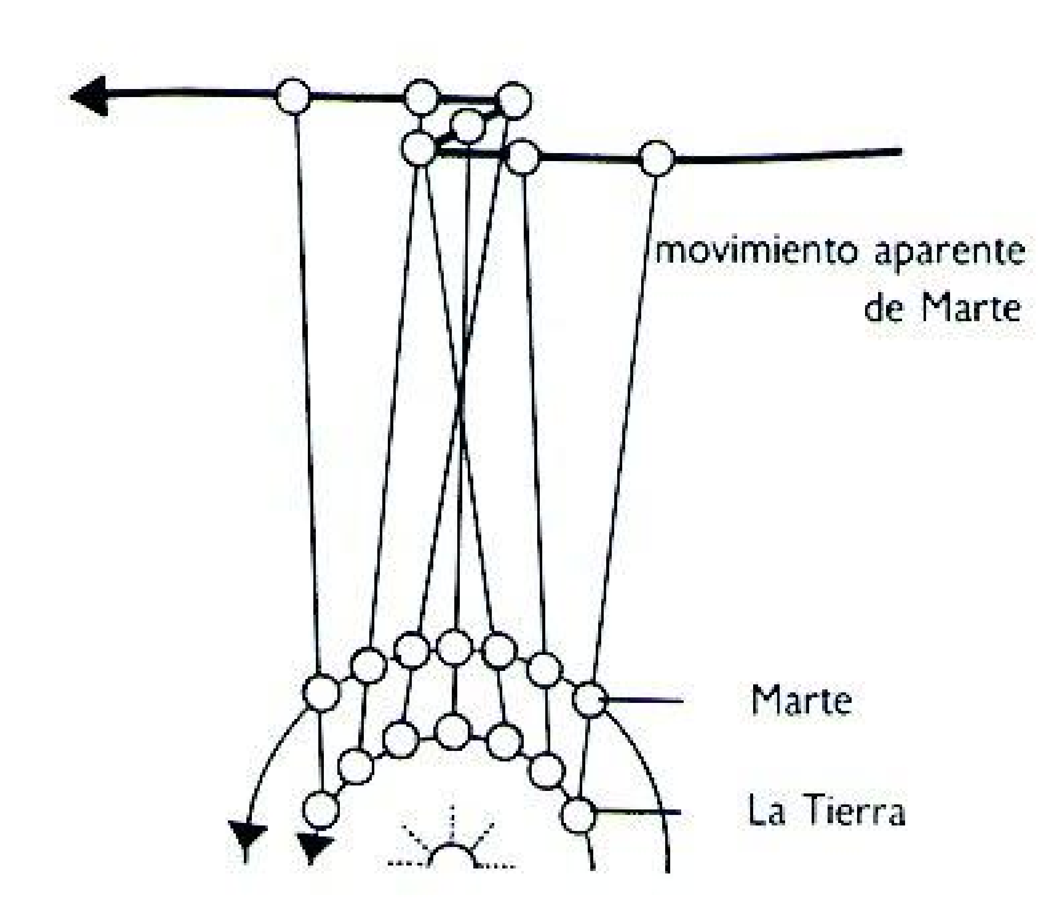


montura simple
Montura telescópica en la que un eje es vertical y el otro horizontal. En consecuencia, el instrumento gira arriba y abajo (en altitud) y en torno al eje (acimut). Posee la desventaja de que requiere dos movimientos simultáneos, uno de altitud y uno de acimut, para seguir la trayectoria curvada de los cuerpos celestes.



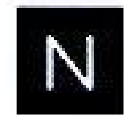
movimiento aparente
Dícese del movimiento de una estrella en la esfera celeste causado por su movimiento real. Se trata de un movimiento que altera las coordenadas* del astro en cuestión.

movimiento retrógrado
Movimiento de un planeta en dirección este-oeste, relativo a las estrellas que configuran el fondo tal y como se observan desde la Tierra. Se refiere también al movimiento en el sentido de las manecillas del reloj visto desde el polo norte celeste, ya se trate de cometas, asteroides y satélites que



describen sus órbitas o de un cuerpo que rota sobre su eje.

muón
Leptón* dotado de una carga eléctrica igual a la del electrón, si bien 207 veces más pesado que éste.



nadir
Punto de la esfera celeste situado exactamente bajo el observador. Es el opuesto del cenit*.

nebulosa
Nube espacial de polvo o gas. Las nebulosas pueden ser brillantes u oscuras, difusas o compactas.

nebulosa de absorción
Nube de polvo y gas que absorbe —y, por tanto, obstruye— la luz procedente de los objetos más distantes. Se observa ópticamente en forma de manchas oscuras en el firmamento.

nebulosa difusa
Nebulosa brillante de nuestra propia galaxia. Es de forma irregular, a diferencia de las nebulosas planetarias*.

nebulosa de emisión
Nebulosas que emiten radiación visible. Pueden ser difusas o compactas.

nebulosa de reflexión
Nube de gas incandescente que brilla debido a que dispersa la luz de una o más estrellas contenidas en su interior.

nebulosa planetaria
Nebulosa distinguible visualmente a través del telescopio en forma de pequeño disco verdoso, similar a un planeta distante. Hoy día se sabe que se trata de bolsas simétricas de gas en expansión en torno a una estrella ya cercana al fin de su vida.

neutrino
Leptón* desprovisto de masa y de carga eléctrica; sólo interviene en reacciones gobernadas por la fuerza nuclear débil.

neutrón
Fermión* desprovisto de carga eléctrica y dotado de una masa ligeramente superior a la del protón. Forma parte integrante de numerosos núcleos atómicos.

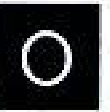
nova
Significa «nueva», y se refiere a estrellas viejas que de pronto se encienden, aumentando su brillo hasta en 10.000 veces, destacando así súbitamente en el firmamento. Las novas parecen hallarse asociadas a sistemas binarios en los que uno de los miembros es una enana blanca. El encendido tiene lugar en la enana blanca a medida que absorbe materia de su compañera.

La combustión de las novas dura apenas unos días o semanas. A continuación, retornan a su brillo original durante meses o incluso años.

nube de Oort
En 1950, el astrónomo holandés Jan Oort sugirió que los cometas podrían originarse en una nube de material cometario que se extendería en las fronteras de nuestro sistema solar a una distancia de entre 0,47 y 1,6 años luz. Cuando los cometas situados en esta nube se vieran alterados por el paso de una estrella, algunos podían verse desviados hasta adoptar órbitas solares de gran período. Si dichos cometas se aproximaran lo suficiente a un planeta gigante, tal como Júpiter, podrían verse impulsados a describir órbitas de corto período.

nucleosíntesis
Formación de núcleos atómicos pesados a partir de los núcleos de otros átomos más ligeros. Las condiciones necesarias para que se produzca esto se dan en las regiones centrales de las estrellas, en las que el hidrógeno es transformado en helio. En las de mayor tamaño, el helio es transformado en carbono a lo largo de etapas sucesivas. Las explosiones de supernovas* producen las condiciones necesarias para la síntesis de núcleos más pesados que el hierro. La nucleosíntesis fue uno de los rasgos distintivos de las primeras fases del *Big Bang*.

nutación
Movimiento cabeceante del eje de rotación de la Tierra debido a las variaciones en la distancia que la separan del Sol y de la Luna y, por ello, a los efectos gravitatorios a que se halla sometida.

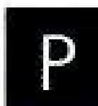


objetos BL Lacertae
Objetos extraordinariamente compactos que emiten grandes cantidades de radiación, si bien de modo variable. Hoy día se sabe que se encuentran en el interior de ciertas galaxias distantes. Algunos de ellos muestran cierta similitud con los quasars. Se conocen unos 50 de ellos.

ocultamiento
(*Véase* eclipses y ocultamientos.)

oposición
(*Véase* conjunción y oposición.)

órbita
Recorrido de un cuerpo en torno a otro. Dependiendo de la velocidad del primero y de la masa del segundo, describirá una elipse —y, por ello, será cerrada— o seguirá las curvas abiertas de una parábola o hipérbole. En estos dos casos, el cuerpo orbital no regresará para describir nuevos circuitos.



P

paradoja de Olbers
Paradoja estudiada en 1826 por el astrónomo aficionado alemán Heinrich Olbers, pero propuesta ya mucho tiempo antes. Se refiere a la cuestión de por qué el cielo es negro de noche si el universo es estático e infinito y las estrellas se hallan uniformemente distribuidas en él, dado que en tales condiciones debería resultar brillante. Hoy sabemos que el universo no es estático, y que las estrellas no se hallan uniformemente distribuidas en él, sino agrupadas en galaxias que se alejan unas de otras. El corrimiento hacia el rojo de su radiación, unido al hecho de que el universo posee una edad definida y por ello no puede extenderse indefinidamente, explica por qué el cielo de la noche es oscuro.

paralaje
Deriva aparente de un objeto cercano en relación al fondo de objetos distantes. En astronomía, se emplea el paralaje para determinar las distancias en el espacio.

parhelio
Efecto atmosférico debido a la refracción y reflexión de la luz solar en el que aparecen manchas luminosas a ambos lados del Sol con una separación de 22°.

paridad, no conservación de la
La paridad es la conversión de una imagen en su imagen inversa. Así, la imagen de espejo de la mano izquierda es una mano derecha. En física atómica, se utiliza una transformación matemática para alcanzar la paridad.

En tiempos, se pensaba que la paridad general siempre se conserva en el sistema de partículas atómicas fundamentales, pero posteriormente se ha demostrado que dicha paridad no se conserva en aquellas interacciones en las que interviene la fuerza nuclear débil. En este sentido, el universo parecía poseer un diseño en términos de diestro y siniestro. No obstante, luego resultó evidente que si se tenían en cuenta las antipartículas (conjugación de carga) y se consideraban también los acontecimientos como ocurriendo hacia el pasado (inversión temporal) se conservaba otra cantidad en la que intervenía la paridad.

parsec
Distancia en la que un cuerpo poseería un paralaje anual de un segundo de arco. Equivale a 3,26 años luz. Ninguna estrella cercana al Sol está a una distancia tan corta como esa.

perigeo
El punto más cercano a la Tierra en la órbita de la Luna o de un satélite artificial.

perihelio
Punto más cercano al Sol en la órbita de un cuerpo que gire en torno a él.

período sideral
Período de revolución medido con respecto a las estrellas. Se utiliza para expresar el tiempo que tarda un planeta en completar la órbita del Sol o el tiempo que tarda un satélite para orbitar un planeta.

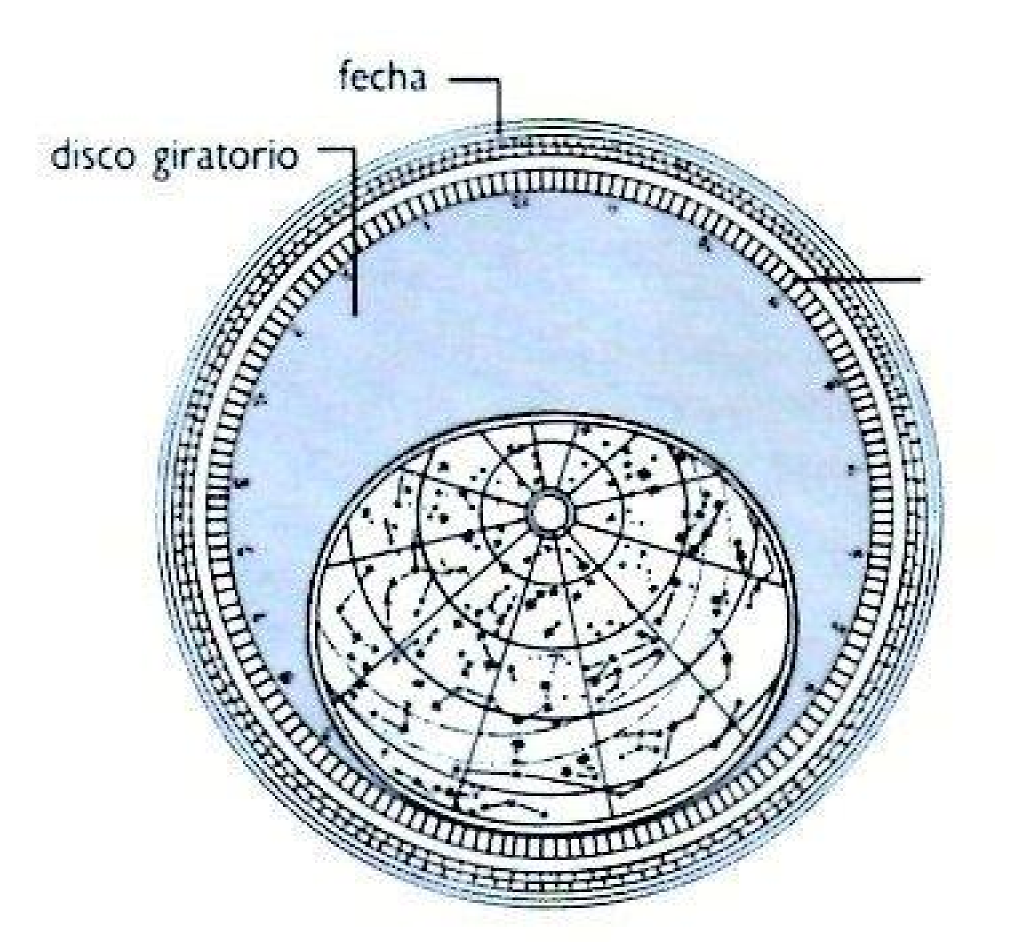
período sinódico
Dícese del tiempo que tarda un cuerpo celeste en regresar a una posición dada en relación con la Tierra. En el caso de los planetas, se trata del período que separa dos conjunciones u oposiciones sucesivas. (*Véase* conjunción y oposición.)

planeta
Cuerpo situado en órbita en torno al Sol. Su brillo procede exclusivamente de la luz solar reflejada. Se aplica a todo cuerpo similar situado en la órbita de una estrella.

planeta inferior
Planeta cuya órbita está situada dentro de la de la Tierra. Los dos planetas inferiores son Mercurio y Venus.

planeta superior
Dícese de los planetas del sistema solar cuya órbita en torno al Sol se halla más alejada que la de la Tierra.

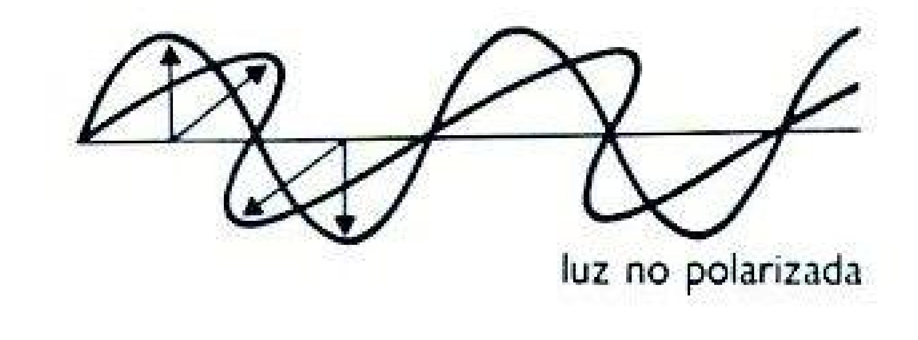
planisferio
Mapa plano (en dos dimensiones) de una parte de la esfera celeste centrada bien en el polo norte celeste o en el sur. Dotado de un anillo giratorio que lo circunda, puede utilizarse para indicar qué constelaciones resultan visibles a cualquier hora de la noche en cualquier día del año.

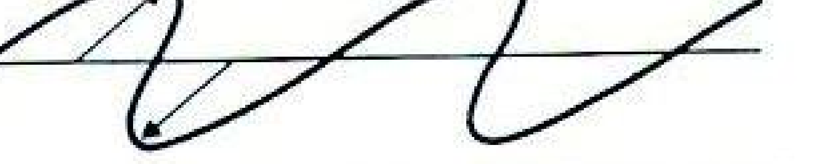


plasma
Gas ionizado consistente en iones y electrones moviéndose libremente. Los plasmas se encuentran afectados por campos eléctricos y magnéticos, y se encuentran en las estrellas y en el gas intergaláctico.

poblaciones I y II
Las estrellas de Población I son jóvenes y se encuentran en los brazos espirales situados en el plano de la Galaxia. Tienden a ser calientes y brillantes, y contienen niveles relativamente altos de metales pesados. Los objetos de Población II son más antiguos y se encuentran diseminados por toda la Galaxia. Los situados en el halo son fácilmente distinguibles.

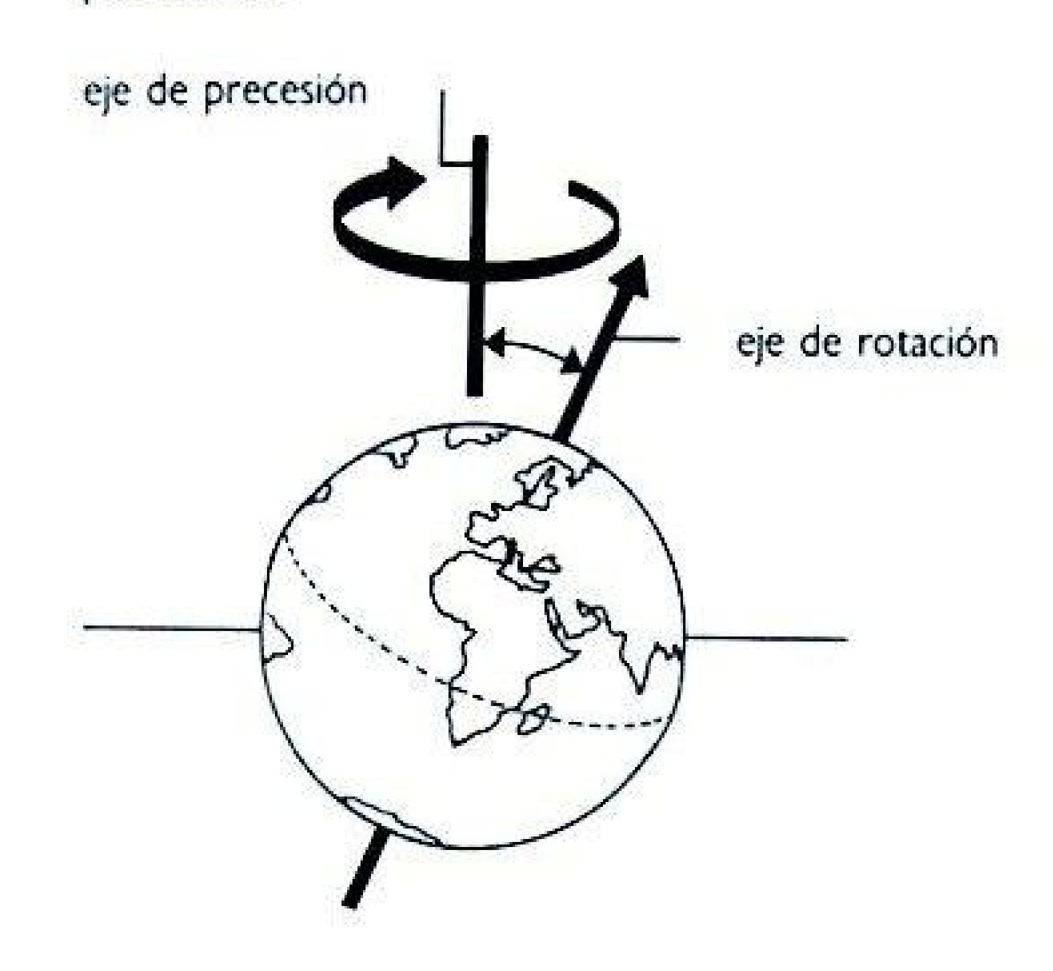
polarización
Las ondas de radiación oscilan perpendicularmente a la dirección en la que se propagan. Suelen oscilar en todas y cada una de las direcciones de vibración perpendiculares a su avance, a no ser que la radiación sufra una polarización lineal, en cuyo caso las ondas descansan en un plano. No obstante, dichos planos pueden rotar; se dice entonces que la onda se halla polarizada circularmente.


luz no polarizada


luz de polarización lineal

potencia de resolución
Dícese de la capacidad de un telescopio para mostrar los detalles. Técnicamente, es el ángulo formado entre los objetos más cercanos que éste puede distinguir. Depende del nivel de apertura entre el espejo principal, la lente principal o cualquier otro sistema de captación de luz y las ondas de radio de la radiación observada.

precesión



Movimiento continuo del eje de un cuerpo rotatorio debido a fuerzas gravitatorias externas. En el caso de la Tierra, la precesión obliga a los polos celestes a describir un pequeño círculo en la esfera celeste. El movimiento en torno a este círculo es «retroactivo» (es decir, en dirección este-oeste y, por tanto, opuesto a la rotación diaria de la Tierra). Obliga a los equinoccios a un desplazamiento hacia el oeste a lo largo de la eclíptica. Así, la precesión produce un cambio continuo en la ascensión recta y en la declinación, así como en la latitud y longitud celestial de los astros. Cada circuito completo de los polos —y, por tanto, de los equinoccios— dura 25.800 años.

principio de equivalencia
Principio de la teoría de la relatividad de Einstein según el cual las fuerzas debidas a la gravedad y a la inercia de un cuerpo (su resistencia a un cambio de velocidad) son equivalentes. Como resultado, los objetos que sufran una caída libre en una caja sometidos a un campo gravitatorio mostrarán el mismo comportamiento que si se encontraran en el espacio vacío lejos de cualquier cuerpo gravitatorio. Del mismo modo, los objetos situados en el interior de una caja que sufran una aceleración a través del espacio mostrarán el mismo comportamiento que si se encontraran estacionarios en un campo gravitatorio.

principio de exclusión
En la mecánica cuántica, principio según el cual nunca dos fermiones (partículas dotadas de un spin que no es un número entero, tales como los electrones, protones y neutrones) pueden ocupar estados de las mismas características cuánticas (spin, etc.). El principio de exclusión explica por qué los electrones de un átomo no se reúnen en la órbita más baja.

principio de incertidumbre
En 1927, el físico alemán Werner Heisenberg publicó su principio de incertidumbre o de indeterminación, surgido de sus trabajos matemáticos acerca de la teoría cuántica. Afirma que la posición e ímpetu (masa multiplicada por velocidad) de una partícula no pueden ser especificados al mismo tiempo. En torno a toda partícula existe una incertidumbre o, por decirlo de otro modo, las cifras que especifican su posición y movimiento tienen un rango estadístico.

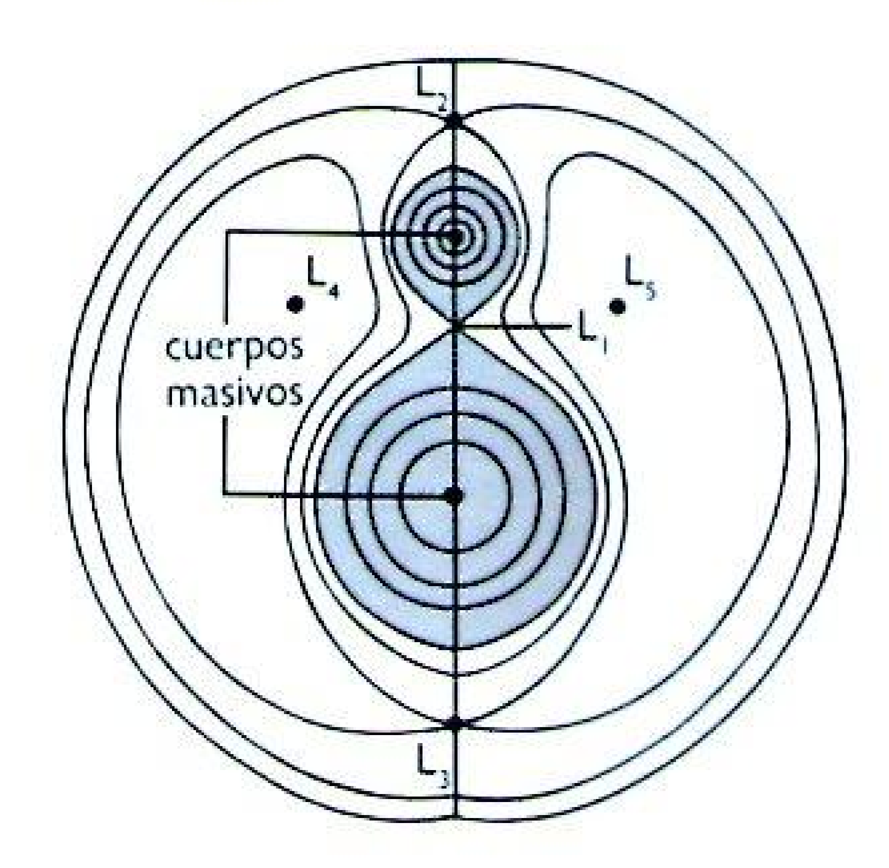
protoestrella
Etapa primitiva en la formación de una estrella, posterior a su condensación a partir de materia gaseosa y previa a la densificación que permite el desencadenamiento de las reacciones nucleares que le proporcionan su brillo.

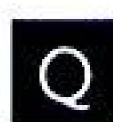
protón
Hadrón* situado en el núcleo de un átomo y dotado de carga eléctrica positiva. Se compone de tres quarks y posee una masa aproximadamente 1.836 veces superior a la del electrón.

protuberancias
Nubes de gas situadas en la parte superior de la cromosfera o en la parte inferior de la corona solar. Contra un fondo oscuro —tal como el que se produce durante los eclipses solares totales— su aspecto es el de nubes o bucles brillantes; las de hidrógeno tienen color rosado, y contra el disco solar muestran el aspecto de filamentos oscuros. Las protuberancias se clasifican como activas —en cuyo caso sufren cambios relativamente rápidos— o pasivas, las cuales pueden durar meses. Se producen con mayor frecuencia unos pocos años después del inicio de cada ciclo solar mínimo.

púlsar
Estrella de neutrones* en rotación. Emite pulsaciones regulares de radiación.

punto de Lagrange
Posición en la que un cuerpo pequeño puede permanecer en una órbita estable en compañía de dos cuerpos masivos situados en órbita uno en torno al otro. Existen cinco puntos de esta clase, descubiertos en 1772 por el matemático francés Joseph Louis Lagrange. Los llamados asteroides troyanos ocupan los puntos de Lagrange de la órbita de Júpiter.





quark
Partícula fundamental que forma todos los hadrones, esto es, todas las partículas sujetas a la acción de la fuerza nuclear fuerte*. Se conocen seis tipos (o «sabores»): «arriba», «cima» y «encantado», cada uno de ellos dotado de una carga eléctrica de $+^2/_3$, y «fondo», «abajo» y «extraño», dotados de una carga eléctrica de $-^1/_3$. Todos poseen un spin de $^1/_2$. Un neutrón, por ejemplo, se compone de un quark arriba y dos abajo (con cargas de $+^2/_3$, $-^1/_3$, $-^1/_3$), lo que le proporciona su carga total característica de cero.

quasar
Acrónimo de *fuentes radio-emisoras cuasi estelares*. Los quasars son similares a las estrellas y muestran un prodigioso corrimiento hacia el rojo. Hoy día se piensa que se trata de objetos sumamente distantes situados, probablemente, en los núcleos de galaxias activas.



radiación de Cherenkov
Radiación causada por partículas eléctricamente cargadas y de alta energía al atravesar un material no conductor de electricidad. La velocidad de las partículas debe ser mayor de la velocidad a la que la luz atravesaría el mismo material.

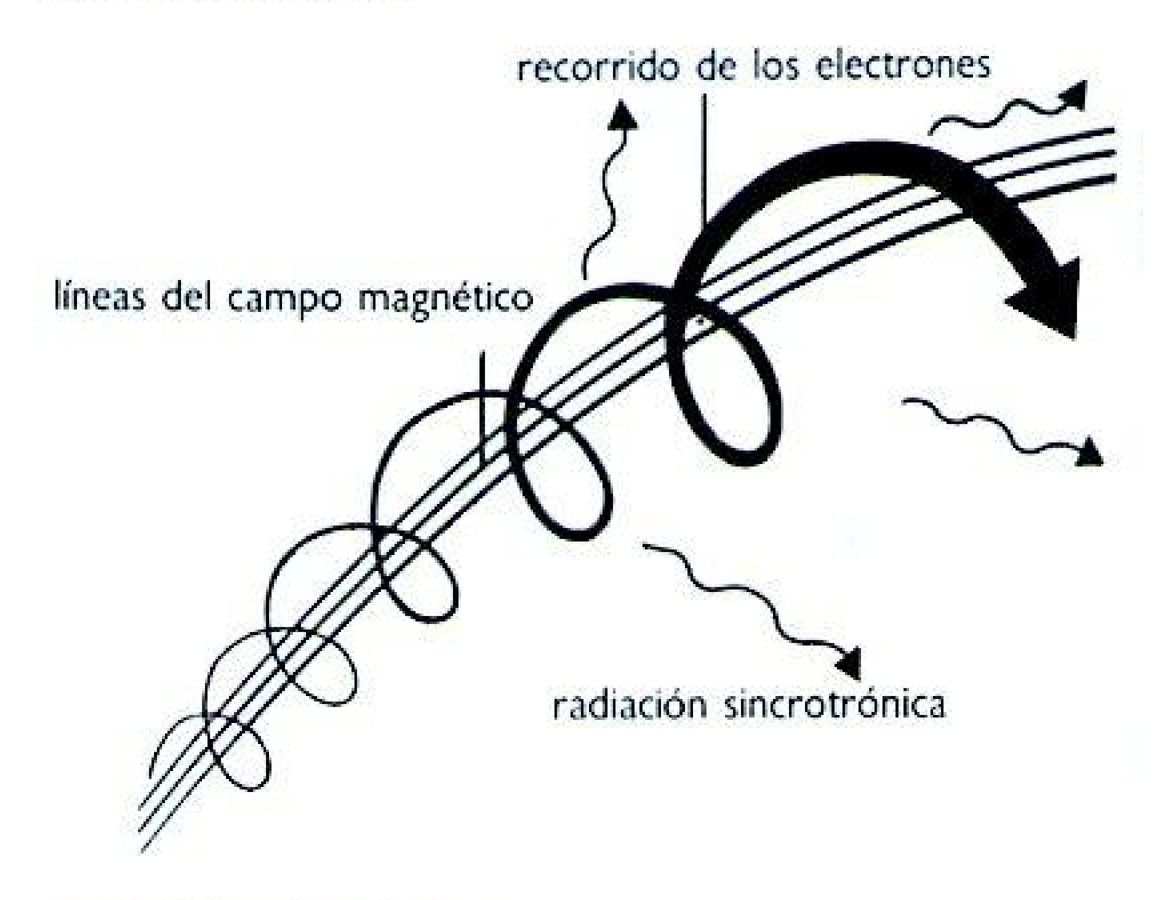
radiación cósmica de fondo
Radiación de microondas con una frecuencia máxima de 1 mm. Resulta visible uniformemente en todo el firmamento. Se cree que se trata de los restos ya enfriados de la bola de fuego del *Big Bang* que dio inicio al universo.

radiación electromagnética
Clase que agrupa a todas las radiaciones desde las ondas de radio hasta los rayos X y gamma. Incluye las longitudes de onda visible, ultravioleta e infrarroja.

radiación gamma
Radiación de extraordinaria energía y longitud de onda más corta que 10^{-8} (una cienmillonésima parte) milímetros.

radiación infrarroja
Radiación situada más allá del extremo rojo del espectro. Sus longitudes de onda oscilan entre 1 mm y 0,001 mm. A veces se conoce como «calor radiante», y es rápidamente absorbida por el vapor de agua de la atmósfera, lo que, en consecuencia, limita las observaciones que pueden realizarse desde observatorios terrestres.

radiación sincrotrónica
Un sincrotrón es una máquina diseñada para acelerar las partículas atómicas hasta velocidades muy elevadas conduciéndolas a lo largo de un campo magnético circular. Los electrones y otras partículas cargadas así acelerados emiten radiación electromagnética en ángulo recto con los recorridos que trazan. La longitud de onda de esta radiación sincrotrónica depende de la masa, la carga eléctrica y la velocidad de las partículas que en ella intervienen.

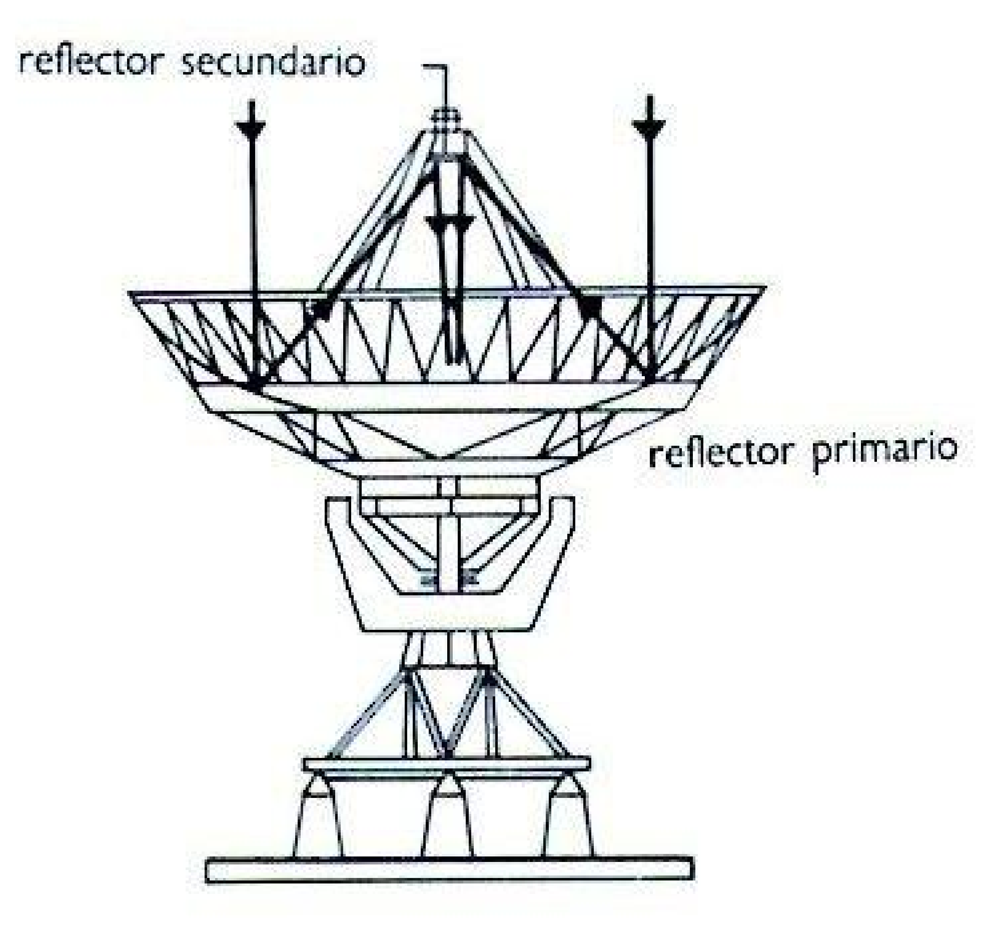


radiación ultravioleta
Radiación situada más allá del extremo violeta del

espectro visual, de longitud de onda entre 380 y 25 millonésimas de milímetro. Tan sólo las de longitudes de onda más largas son capaces de penetrar la atmósfera.

radioactividad
Descomposición espontánea del núcleo de los isótopos* en otro núcleo atómico. Viene acompañada por una emisión de energía en forma de partículas atómicas y, en ocasiones, también de radiación de longitud de onda muy corta. El tiempo que tardan estos átomos en reducir su número a la mitad se conoce como su media vida o *semiperíodo de desintegración.*

radiotelescopio
Telescopio diseñado para la recepción y obtención de imágenes de fuentes de radio celestes. Su forma puede ser desde un conjunto de antenas diseñadas para realizar una observación interferométrica —tal y como sucede en los telescopios de síntesis de abertura y en los VLAs *(very large arrays)*— hasta un telescopio de forma parabólica similar a un reflector óptico. Dichas parabólicas pueden hallarse conectadas entre sí para formar un interferómetro de gran tamaño.



rayos cósmicos
Partículas atómicas de muy alta energía, en su mayor parte protones, que se desplazan a través del espacio. Al chocar con la atmósfera terrestre decomponen los átomos y moléculas de aire produciendo una lluvia de otras partículas atómicas.

rayos X
Radiación electromagnética de alta penetración y longitud de onda sumamente corta. Poseen un ámbito de longitud de onda situado entre 10^{-5} y 10^{-8} mm (entre una cienmilésima y una diezmillonésima de milímetro). La radiación X procedente del espacio revela la existencia de reacciones de elevada energía en los cuerpos celestes.

reacción termonuclear
Reacción a elevada temperatura entre núcleos atómicos que tiene como resultado su fusión para formar núcleos más pesados. Una de dichas reacciones —la que convierte los núcleos de hidrógeno en núcleos de helio— constituye la fuente principal de energía de las estrellas.

refracción
Combamiento o curvatura de un haz de radiación al pasar de un medio a otro, debido a un cambio de velocidad de las ondas que componen la radiación al penetrar un medio dotado de diferente densidad.

regiones HI y HII
Las regiones HI son aquellas en las que el hidrógeno neutro se halla presente en el espacio interestelar. Se detectan debido a que emiten en una longitud de onda de 21 cm. Las regiones HII son aquellas en las que predomina el hidrógeno ionizado, tal como sucede en la brillante nebulosa incasdencente de Orión, y otras.

regolito
Capa de roca y de fragmentos de polvo que cubre la superficie de la Luna, Marte y otros cuerpos similares dotados de atmósfera escasa o inexistente.

relación período-luminosidad
Relación entre el período de variación y el brillo real de las estrellas variables Cefeidas*. Descubierta en 1912 por la astrónoma norteamericana Henrietta Leavitt.

resonancia
Tiene lugar cuando el período orbital de un cuerpo es una fracción exacta del de otro cuerpo orbital cercano de masa superior. Tiene como resultado una serie de «tirones» ejercidos por el mayor sobre el menor y da lugar, por ejemplo, a las lagunas de Kirkwood* del cinturón de asteroides.

rotación capturada (sincrónica)
Tiene lugar cuando la rotación axial de un satélite natural iguala su período orbital en torno a un planeta. Puede suceder en satélites próximos a sus cuerpos primarios, como es el caso de la Luna.

S

satélite
Dícese de todo cuerpo situado en órbita en torno a otro. En astronomía, se aplica habitualmente a las lunas planetarias y a los satélites artificiales.



Estos últimos pueden hallarse situados en diversas órbitas: los ecuatoriales de 24 horas se utilizan para sistemas de comunicación, los polares para logar cobertura global y los inclinados de baja altitud para labores topográficas y de observación.

secuencia principal
Zona del diagrama de Hertzsprung-Russell en la que descansa la mayoría de las estrellas. Se extiende desde abajo a la derecha —zona en la que se encuentran las estrellas rojas, frías y poco brillantes— hasta arriba a la izquierda, en donde se sitúan las más calientes y brillantes.

simetría y supersimetría
Se dice que una teoría o proceso atómico posee simetría cuando no sufre cambio alguno al realizar ciertas operaciones sobre ellos.

Rotura de simetría es un concepto que se refiere al paso a un estado de simetría más bajo que el previamente existente.

Simetría geométrica es la que tiene lugar, por ejemplo, cuando se aplican operaciones de rotación y reflexión a un círculo, ya que éste no cambia de forma.

Simetría de calibre o «gauge» es la que se refiere a las operaciones matemáticas de reescalación o recalibramiento de ciertas cantidades que no alteran sus relaciones esenciales.

Supersimetría es una extensión de la simetría que une las partículas unitarias y las mensajeras (p. ej. los fermiones* y bosones*) y, por tanto, la materia y las fuerzas.

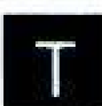
sistema solar
Sistema formado por los planetas y por sus satélites naturales junto con los asteroides, cometas y restos interplanetarios situados en órbita en torno al Sol. El límite exterior del sistema se halla formado por la nube de Oort*.

spinar
Objeto hipotético supermasivo situado en el centro de las galaxias activas y origen de una emisión de energía similar a la de los púlsares*.

supercúmulos
Cúmulos de cúmulos de galaxias, algunos de los cuales pueden tener hasta 360 millones de años luz de diámetro.

superfuerza
Término utilizado para expresar la idea de que el universo se halla gobernado por una fuerza única. En dicha fuerza intervendrían las cuatro fuerzas fundamentales, esto es, la gravedad, el electromagnetismo y las fuerzas nucleares fuerte y débil, según las teorías de la gran unificación (GUT).

supernova
Estrella próxima al fin de su vida que estalla y despide la mayor parte de su materia hacia el espacio.

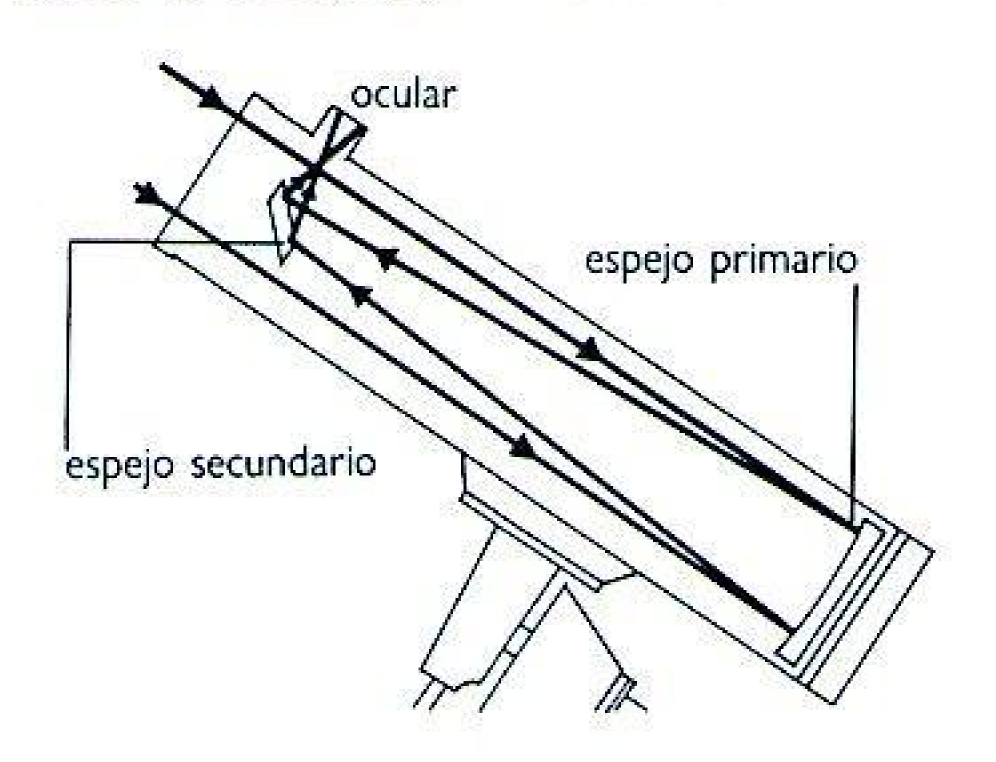


T

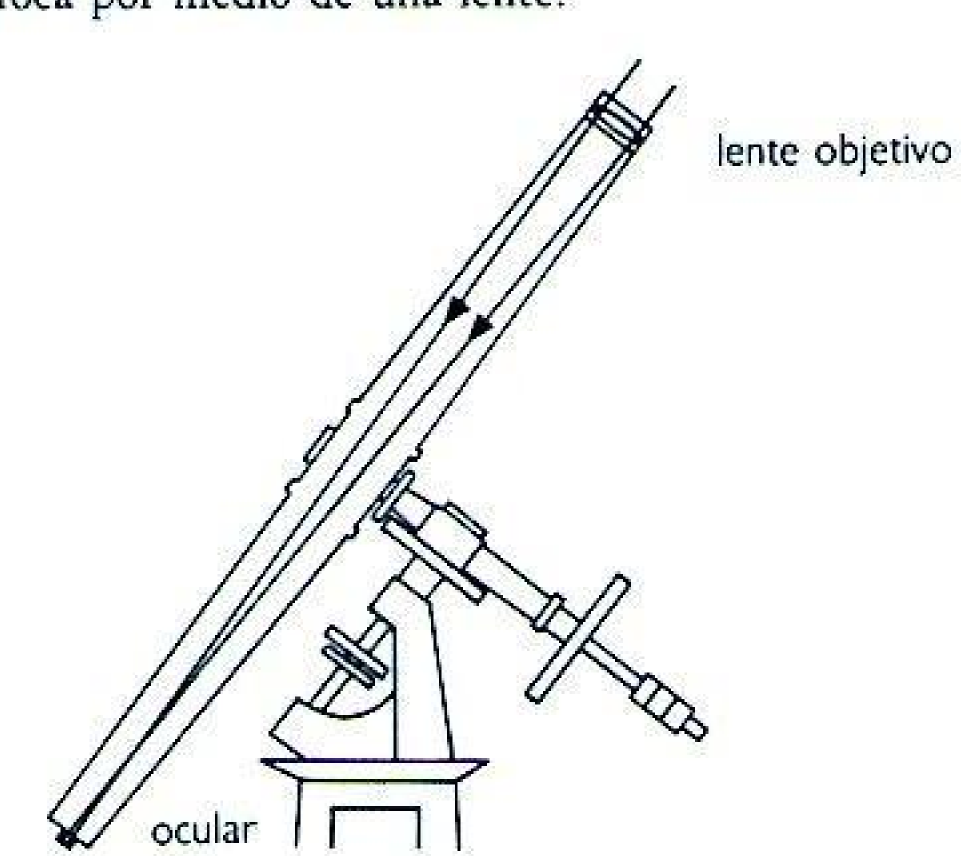
tectita
Cuerpos pequeños, vidriosos y redondeados que habitualmente muestran una forma aerodinámica y poseen aproximadamente el tamaño de un botón. Se encuentran fundamentalmente en cuatro emplazamientos distintos. Se desconoce si podrían tener un origen extraterrestre.

telescopio múltiple
Diseño de telescopio óptico dotado de una serie de espejos principales que conducen la luz a un foco común. El propósito es construir un telescopio con capacidad de recepción de luz similar al de un telescopio único de mucho mayor tamaño. El telescopio múltiple situado en Mount Hopkins, al sur de Tucson, cuenta con seis espejos, cada uno de ellos de 183 cm de diámetro, y equivale a un espejo simple de 4,5 metros de diámetro. Estos espejos, relativamente pequeños, son menos susceptibles de distorsionarse por su propio peso.

telescopio reflector
Telescopio óptico en el que la luz se enfoca por medio de un espejo primario curvado.



telescopio de refracción (o anteojo)
Telescopio óptico en el que la luz se recoge y enfoca por medio de una lente.



teoría de las supercuerdas
Teoría que sugiere que las partículas atómicas son cuerdas vibrantes situadas en un universo de 10 y 11 dimensiones.

teoría del universo estable
Teoría del universo propuesta originalmente en 1948 por Hermann Bondi, Fred Hoyle y Thomas Gold, según la cual el universo nunca tuvo comienzo ni tendrá fin, sino que permanece en una situación estacionaria. Tras el descubrimiento de la radiación de fondo en 1965, hubo de ceder paso a la teoría del *Big Bang* caliente.

terminator
Límite entre los hemisferios iluminado y oscuro de las lunas y los planetas.

titilación
Centelleo o rápida variación de la intensidad de radiación procedente de una fuente lejana. El centelleo de las estrellas se debe a la refracción producida por movimientos que tienen lugar en el interior de la atmósfera terrestre. La titilación de las fuentes de radio se debe al movimiento de la materia interestelar situada entre la fuente de emisión y la Tierra.

tránsito
Recorrido de un cuerpo celeste a lo largo del meridiano del observador. El término se utiliza asimismo para designar el recorrido de los planetas inferiores sobre el disco solar. Dichos tránsitos planetarios son infrecuentes: los de Mercurio tienen lugar a intervalos de 3, 13 y 46 años; los de Venus se producen en pares separados entre sí por 8 años, con pares sucesivos separados por largos intervalos de más de un siglo. Los dos tránsitos acaecidos en el siglo XVIII sirvieron para determinar la distancia entre la Tierra y el Sol.



U

umbra y penumbra
La umbra es la parte interior y más oscura de una sombra, mientras que la penumbra forma el halo más brillante que rodea a ésta. Ambos términos se utilizan también en la descripción de los eclipses* y las manchas solares*.

unidad astronómica
Distancia media entre la Tierra y el Sol. Resulta sumamente útil para el estudio del sistema solar. Su valor se halla establecido en 149.597.870 km.

universo abierto
Universo que se expande para siempre.

universo cerrado
Una de las soluciones de las ecuaciones que expresan la naturaleza del espacio-tiempo. Sugiere un universo de forma esférica que se contraería tras su expansión inicial.



V

velocidad de escape
Velocidad que debe alcanzar un cuerpo para liberarse de un cuerpo celeste y escapar al espacio. La velocidad de escape depende del tamaño y masa del cuerpo celeste en cuestión. En el caso de la Tierra es de 1,18 km/s, pero en el Sol es al menos de 617,3 km/s.

ventana
En astronomía, intervalo de longitudes de onda capaces de penetrar la atmósfera de un planeta. En los vuelos espaciales, período en que una nave puede lanzarse para una misión determinada.

Vía Láctea
Banda de luz lechosa que atraviesa el firmamento en los hemisferios norte y sur. Así llamada por su aspecto, hoy se sabe que está formada por millones de estrellas, gas y polvo situados en el plano central de nuestra galaxia.

viento solar
Corriente de protones, electrones y algún que otro núcleo de helio enviada en todas direcciones por la corona solar hacia el espacio interplanetario.

Biografías

Bohr, Niels Henrik David 1885-1962
Físico danés. Estudió la estructura atómica en Copenhague y, posteriormente, con Ernest Rutherford en la Universidad de Manchester, Inglaterra. Es célebre por su modelo del átomo (1913), dotado de un núcleo central en torno al cual giran en órbita los electrones, modelo que relacionó con la entonces reciente teoría cuántica, cuyo desarrollo contribuyó a impulsar. Fue galardonado con el Premio Nobel de Física en 1922.

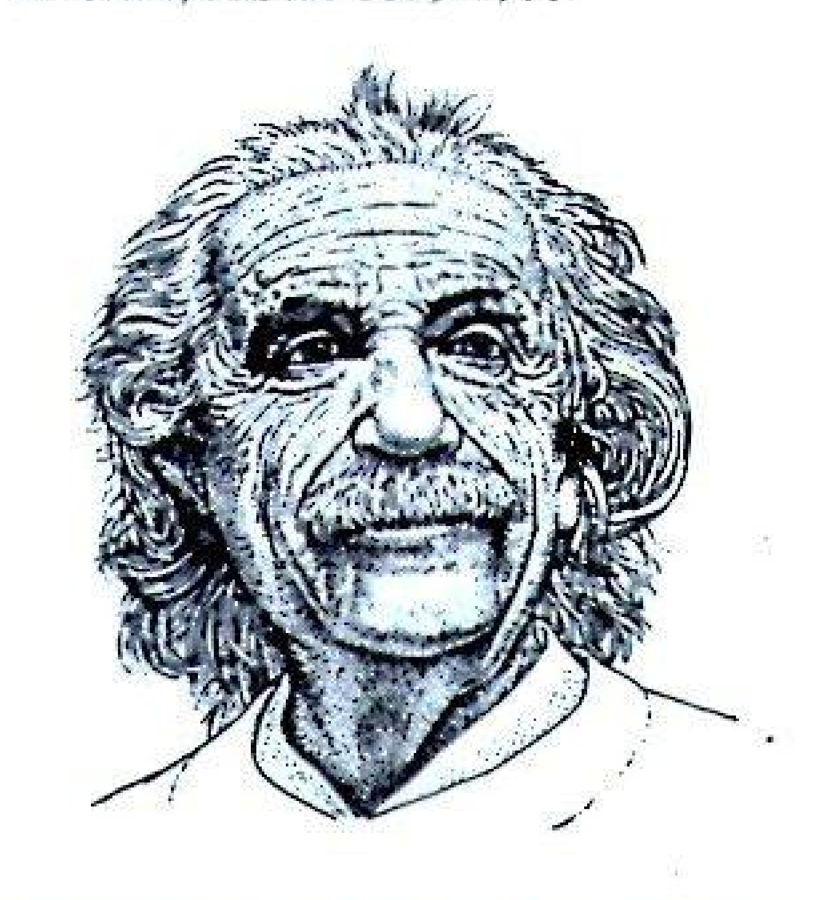
Brahe, Tycho 1546-1601
Astrónomo danés. Le fue cedida la Isla de Hven, en la que construyó un gran observatorio para medir las posiciones celestes, si bien posteriormente se vio forzado a trasladarse a Praga. Diseñaba él mismo sus instrumentos y tenía en cuenta cualquier error inherente que pudieran tener. Brahe obtuvo en sus mediciones un grado de precisión sin precedentes en la era anterior al telescopio. Sus observaciones guiaron a Kepler para la elaboración de sus leyes del movimiento planetario. También ideó su propio sistema planetario, en el que la Tierra permanecía fija en el centro pero los demás planetas giraban en órbita de un Sol móvil.

deBroglie, Louis 1892-1987
Físico y aristócrata francés. Estudió historia y se inició en la física una vez concluida la I Guerra Mundial. En 1924, basándose en una sugerencia realizada por Einstein, propuso que no sólo la luz poseía una naturaleza propia de las ondas, sino que ello también sucedía en el caso de los electrones y otras partículas atómicas. Para ello se basó en el razonamiento matemático. La confirmación experimental de sus teorías tuvo lugar en 1927, y obtuvo el Premio Nobel de Física en 1929.

Copérnico, Nicolás 1473-1543
Astrónomo polaco. Educado en las universidades de Cracovia, Bolonia y Padua, Copérnico era un experto en griego, derecho canónico, medicina, matemáticas y astronomía. Nombrado canónigo no eclesiástico de la Catedral de Frauenburg, le fue concedida una pensión vitalicia y obtuvo una elevada posición administrativa. Hoy día se le recuerda por su libro *De Revolutionibus*, publicado en 1543 con el título *De Revolutionibus Orbium Coelestium* (De las Revoluciones de las Esferas Celestes). En él, proponía que era el Sol, y no la Tierra, el centro del universo, rompiendo así drásticamente con la tradición al relegar esta última al papel de mero planeta.

Eddington, Arthur Stanley 1882-1944
Astrónomo y matemático inglés. Ardiente defensor de la teoría de la relatividad, era también experto en la constitución, masa y luminosidad de las estrellas, y fue el primero en sugerir que las galaxias espirales eran similares a nuestra Vía Láctea.

Einstein, Albert 1879-1955



Físico alemán. Entre 1905 y 1916 desarrolló la teoría de la relatividad, en la que proporcionaba una perspectiva radicalmente nueva del espacio, el tiempo y la gravitación, proponiendo asimismo la equivalencia entre masa y energía. La teoría afectaba a la astronomía y la física en su conjunto. Einstein propuso asimismo la doble naturaleza (de partícula de onda) de la luz y de todas las radiaciones electromagnéticas, y estableció algunos cimientos de la futura teoría cuántica, a la que posteriormente se opuso. En 1933 emigró de Europa a Estados Unidos, donde permaneció durante el resto de sus días.

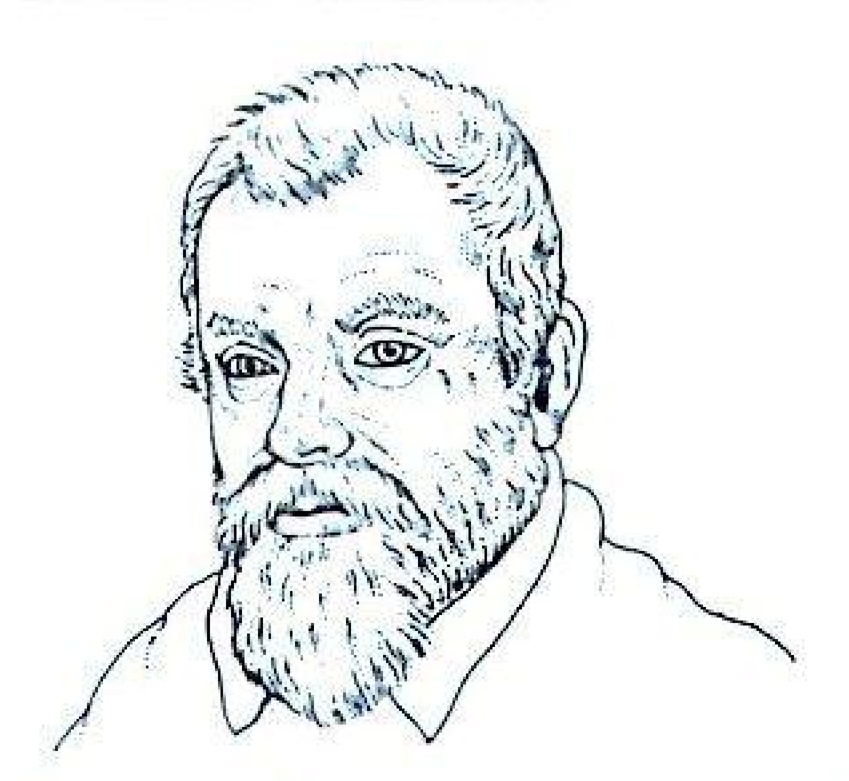
Faraday, Michael 1791-1867
Físico y químico inglés. Fundamentalmente autodidacto, sus investigaciones más notables fueron las realizadas acerca de la relación entre electricidad y magnetismo. Sus investigaciones le condujeron a la invención de la dinamo, del motor eléctrico y del transformador, a la vez que investigaba los efectos del eletromagnetismo sobre la luz. Expresaba sus hallazgos sirviéndose del concepto de los campos eléctricos y magnéticos, que posteriormente ejercieron un profundo efecto en la física y la astronomía.

Feynman, Richard Phillips 1918-1988



Físico norteamericano. Desarrolló la teoría cuántica, eliminando muchas de sus inconsistencias. Junto con Murray Gell-Mann, formuló una teoría para explicar la mayor parte de los fenómenos relacionados con la fuerza nuclear débil. Feynman también desarrolló diagramas simples para ayudar a comprender las complejas reacciones de las partículas. Compartió con Julian Schwinger y Tomonaga Shin'ichiro el Premio Nobel de Física de 1965, tras corregir sus trabajos anteriores acerca de las reacciones entre los fotones y partículas atómicas dotadas de carga eléctrica, tales como los electrones y los positrones (electrodinámica cuántica).

Galilei, Galileo 1564-1642



Físico y astrónomo italiano conocido principalmente por ser uno de los pioneros en el uso del telescopio en astronomía, con el que descubrió la existencia de montañas en la Luna, los cuatro principales satélites de Júpiter, las manchas solares y las fases de Venus. Descubrió asimismo que la Vía Láctea se hallaba compuesta por miríadas de estrellas. Su defensa de la teoría copernicana que situaba al Sol como centro del universo le acarreó graves problemas con la Iglesia católica romana.

Gamow, George 1904-1968
Físico ruso-norteamericano. Contribuyó a desarrollar la teoría de un tipo de desintegración radioactiva, para luego dirigir su atención a los procesos nucleares durante la evolución de las estrellas. En 1948, junto con Ralph Alpher y Hans Bethe, elaboró un documento acerca del origen de los elementos químicos de las estrellas en el que se sugería la existencia previa de un *Big Bang* caliente como comienzo del universo. También sugirió la existencia de un código genético basado en el ADN.

Halley, Edmond 1656-1742
Segundo Astrónomo Real británico. Realizó un mapa de las estrellas del hemisferio sur, así como numerosas observaciones astronómicas, entre las que se incluye un ciclo completo del movimiento lunar, con una duración de 18 años. Sugirió que las nebulosas estaban compuestas por materia gaseosa flotando en el espacio, descubrió que las estrellas poseen movimiento propio y recomendó la utilización de los tránsitos de Venus para determinar la distancia entre la Tierra y el Sol.

Sobre todo, desempeñó un papel fundamental en persuadir a Newton para que escribiera sus célebres *Principia* y, una vez lo hubo logrado, se encargó de editarlo y de sufragar su publicación. Fue el primero en aplicar las leyes de Newton acerca del movimiento planetario a cometas específicos, y en 1682 predijo el regreso del que lleva su nombre, el cual, de acuerdo con sus cálculos, reapareció en 1758.

Heisenberg, Werner Karl 1901-1976
Físico alemán, conocido principalmente por su principio de indeterminación, según el cual existe una incertidumbre inherente en lo que se refiere a la posición y el ímpetu de las partículas atómicas. Obtuvo el Premio Nobel de Física en 1932.

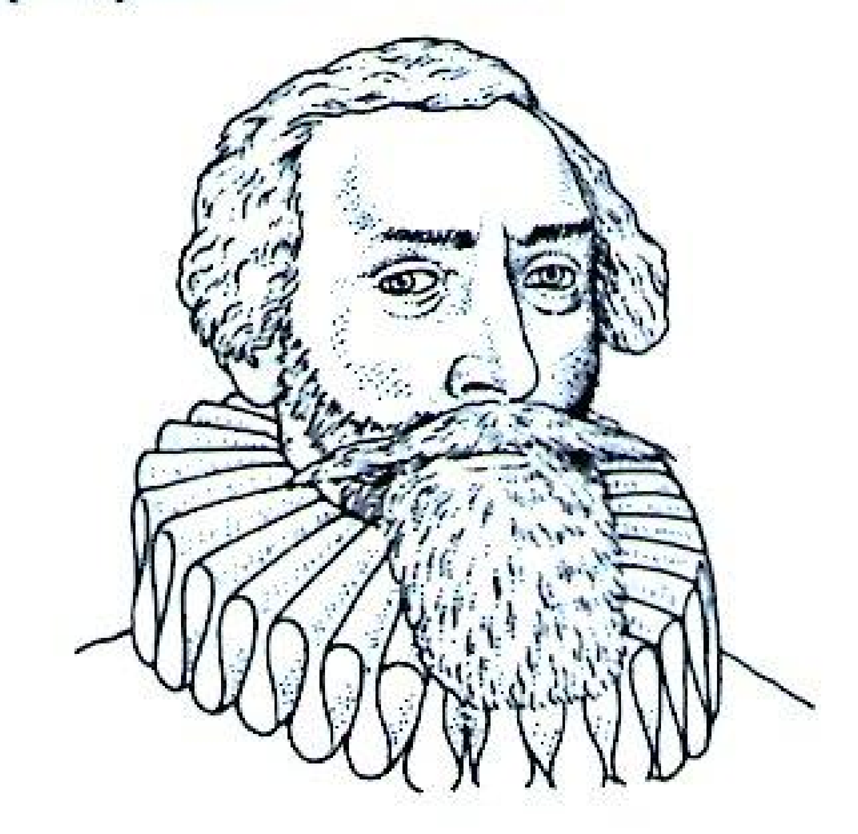
Herschel, Frederick William 1738-1822
Músico y astrónomo anglo-hanoveriano, constructor de telescopios astronómicos de excelente calidad. Diseñó el telescopio más grande del mundo en 1785. Fue también el más grande de todos los astrónomos observadores. Herschel descubrió Urano y catalogó los objetos celestes, especialmente las nebulosas y las galaxias. Fue el primero en sugerir que la Vía Láctea señalaba los límites de una isla formada por estrellas.

Hiparco activo entre **146-127 a. de C.**
Astrónomo griego que descubrió la precisión, calculó la longitud del año con un error de tan sólo $61^1/_2$ minutos y fue el primero en completar un catálogo estelar. También extendió el conocimiento de su época acerca del movimiento de la Luna, determinó la inclinación de la eclíptica con un error de 5 minutos de arco y midió la distancia y el tamaño de la Luna y el Sol. No obstante, como era habitual en la época, los valores que obtuvo con respecto a este último eran demasiado pequeños. Hiparco fue ciertamente el más importante astrónomo observador del mundo antiguo.

Hubble, Edwin Powell 1889-1953
Abogado y astrónomo norteamericano. Hubble es célebre por sus trabajos acerca de las galaxias. En 1924 demostró que éstas eran independientes de la Vía Láctea. Descubrió que las galaxias se alejan de nosotros a una velocidad que depende de la distancia a la que se encuentren, lo que implica la existencia de un universo en expansión.

Jansky, Karl Guthe 1905-1950
Ingeniero de radio norteamericano. En 1928 se incorporó a la compañía Bell Telephone Laboratories, donde se le encargó el estudio de las radiointerferencias. En 1931, descubrió accidentalmente la existencia de ondas de radio procedentes del espacio, pero, si bien publicó su hallazgo al año siguiente, posteriormente abandonó la cuestión. No obstante, su descubrimiento sirvió para extender los cimientos de la radioastronomía moderna.

Kepler, Johannes 1571-1630



Matemático y astrónomo alemán. Conocido inicialmente tras publicar una teoría acerca de los planetas y de su relación con los cuerpos sólidos regulares de la geometría euclidiana. Sobre todo, es célebre por su descubrimiento de tres leyes del movimiento planetario con las que sustituyó la antigua creencia de que los planetas giran en órbitas circulares a una velocidad constante.

Leavitt, Henrietta Swan 1868-1921
Astrónoma norteamericana. En 1908, descubrió la relación entre el período de variación y el brillo intrínseco de las estrellas Cefeidas variables. También desarrolló trabajos fundamentales para determinar las magnitudes estelares.

Maxwell, James Clerk 1841-1879
Matemático y físico escocés. Descubrió la naturaleza de los anillos de Saturno. Aún más importante fue su descubrimiento de la radiación electromagnética.

Messier, Charles 1730-1817
Astrónomo francés. Messier catalogó todos los cúmulos y nebulosas estelares que pudo detectar visualmente con objeto de no confundir otros objetos con la forma difusa que presenta un cometa en el telescopio al aproximarse al Sol. En 1771, publicó una lista de 45 de dichos objetos, y en 1784 la había alargado hasta un total de 103, que forman la base de la numeración de Messier.

Newton, Isaac 1643-1727



Matemático y físico inglés. Se educó en la Universidad de Cambridge, donde fue nombrado profesor de matemáticas en 1669. Newton descubrió que la luz blanca se hallaba compuesta por luz de todos los colores, concibió una teoría según la cual la luz estaba formada por «corpúsculos» o partículas, construyó el primer telescopio reflector útil y sentó las bases del cálculo. Es particularmente conocido por sus leyes del movimiento y por su teoría de la gravitación universal, ambas publicadas en 1687. Ambas constituyen dos de las más importantes contribuciones de su tiempo al desarrollo de la ciencia moderna.

Planck, Max 1858-1947
Físico alemán. Para explicar el modo en que un cuerpo totalmente absorbente («cuerpo negro») irradia calor, Planck sugirió en 1990 que sus átomos oscilantes recibían y emitían radiación tan sólo en cantidades discretas o «quanta». Con ello sentó las bases de la teoría cuántica, la cual, junto con la teoría de la relatividad, revolucionó la física del siglo XX.

Ptolomeo activo entre **161-180 d. de C.**
Astrónomo, geógrafo y matemático griego. Parece que trabajó en Alejandría. Su obra más importante es *Almagesto*, en la que explicaba la astronomía matemática griega. Dicha obra fue referencia obligada durante los 1.500 años siguientes. Fue también un notable geógrafo y uno de los mejores cartógrafos del mundo.

Rutherford, Ernest 1871-1937
Físico neozelandés. Estudió la ionización y la radioactividad, llegando a la conclusión correcta de que los átomos de un elemento se desintegraban espontáneamente para formar otros, lo que le llevó a obtener el Premio Nobel de Química en 1908. En 1911, realizó su mayor contribución a la ciencia con su teoría de que el átomo se hallaba compuesto por un núcleo diminuto acompañado de electrones.

Schrödinger, Erwin 1887-1961
Físico alemán. Formuló una ecuación especial de mecánica cuántica que afecta a los átomos como las ecuaciones del movimiento de Newton afectan al comportamiento de los planetas.

Wegener, Alfred Lothar 1880-1930
Geólogo, meteorólogo y explorador alemán. Dio origen a la doctrina de la deriva de los continentes, publicándola entre 1912 y 1915. Dicha teoría causó gran controversia, y fue luego relegada al olvido por la mayor parte de los geofísicos. No obstante, posteriores estudios del magnetismo de las rocas, realizados durante la década de los cincuenta, han conducido a la aceptación general y perfeccionamiento de la teoría de Wegener.

Índice

(Los números de página que figuran en *cursiva* corresponden a las ilustraciones y a los pies de las mismas.)

A

abejas, vida social 164
aberración de la luz (192)
abultamiento central 52, 55, 56, *60*
aceleradores de partículas 26-27, *26*
acetileno 129, 133, 140
ácido fórmico 74
ácidos nucleicos *(véase* ADN, ARN)
acimut (192)
acondritos 147
actividad estelar, duración de la 170
acumulación jerárquica 38, 40
Adams, John Couch 130
adenina 140, *156*, 160, *163*
ADN 160, *162*, *163*, 167, *167*
  doble hélice 140, 160, *161*
afelio (192)
agua 76, 130, 150
  canales en Marte 119
  congelada 120, 128
  reciclaje del *152*
  vapor de 44, 111, 115, 117, 121, 150
«agujeros de lombriz» 177, 186, *186*
agrupación de materia 32, 38
agujeros blancos 186, *186*
agujeros negros 8, 56, 62-65, *67*, *69*, 89, 148, 168, 170, *171* (192)
  conectados por «agujeros de lombriz» 186, *186*, *187*
  corrimiento hacia el azul 48-49, 71, 80 (193)
  descomposición de 65, *65*
  en el centro de todas las galaxias 68-69
  en galaxias activas *66-67*, 68
  en quasars 70, *70*, 73
  evaporación de 65, 170, 186
Akna (montañas de), Venus 112
albedo 112, (192)
alcohol etílico 74
Alfa Centauri A y B 94, *95*
algas 156, 162
Alpher, Ralph 36
altitud (192)
aluminio 102
aminoácidos 158, 160
  cadenas de 160
amoníaco 106, 121, 128, 130
  nubes de 125
  congelado 120
Andrómeda, galaxia espiral de 48, 51, 52, *56*, 58, 66, *185*
ángulo horario (192)
anillo de colisión (CERN) *26*, 28
anillo de plasma, Júpiter *123*
antimateria 26, 27, 34, *35*, 186 (192)
año luz 46 (192)
apertura (192)
ápex solar (192)
Aphrodite Terra, Venus 112, *112*
apogeo (192)
Apollo XV, misión lunar *137*
ARN 160, *161*, 167
argón 111, 115
Ariel, satélite de Urano 140
Aristarco 180
Aristóteles, acerca de la vida 154
Arp, Alton, distancia de los quasars 179
Arp *220* galaxia 61
ascensión recta (192)
asociaciones estelares 80
astenosfera 114
asteroides 40, 102, 106, 142-43 (192)
  «Troyanos» 142-43, *143*
astronomía óptica *44*
atmósferas 43, 110, 111, *111*, 115, 117, 120-22, 125, 128-29, *129*, 132-33
átomos 10, 22, *37*, 160, 178 (192)
  modelo de Bohr *22*, 23-24
  modelo de Schrödinger *22*, 23-24
  núcleos 22, 34, *35*, 83, 89
atrapamoscas Venus 155
auroras 101, 123, 126, 132 (192)
autorreparación 154
  y autoduplicación en el ADN 160
azúcares 158
azufre 74, 90, 115, *138*, 139, 157, 160

B

Babcock, Horace 98-99
bacterias 155, 156, *157*, 160, 162
ballenas, encefalización de las 163
bariones (partículas pesadas) 26
Barnard, Edward 95
Barnard, estrella de 95, 105
Barnes, Joshua 61
Basri, Gibor 105
Beethoven (cráter de), Mercurio 108
Bell, Jocelyn 92
berilio 34, 83
Berkeley, obispo George 184
Bessel, Friedrich 94
Beta Pictoris *104*, 105
Big Bang 8, 21, 22, 64, 186
  después del 30-36, *30-37*
  recreación de condiciones 170
  dimensiones arrolladas 174
Big Bang, teoría 8, 178-79
Big Crunch 168, 170, *170*
Bode, Johann 142 (202)
Bohr, Niels 23-24 (204)
Bok, Bart J. 78
Bolyai, Janos 18
bombas atómicas 14
bosones (192)
Brahe, Tycho (204)
brazo de Centauro, Vía Láctea, 56, *57*
Bunsen, Robert 42

C

Cabeza de Caballo (nebulosa), en Orión 74
cadenas cósmicas 38 (192)
cadenas montañosas terrestres, creación de las *114*
calcio 90, 102, 145, 146
calentamiento radiactivo, Luna 137
Calisto, satélite de Júpiter 138, 139, *139*
Calvin, Melvin 158
Cámbrico, período 162
campos de fuerza 28 (192)
campos gravitatorios 20, 21
campos magnéticos 15, 66, *99*
  estrellas de neutrones 92
  Júpiter 122, 123
  Mercurio 109
  Neptuno 130, 132
  Saturno 125, 126
  Urano 128
Can Menor 94
canales de Marte 117-18
Cangrejo, nebulosa del 90, 178
  como púlsar 92, *92*, *93*
capa de ozono 43 (192)
  «agujeros» en la 152
capa de superfluido, en los púlsares 92
Carbonífero, período 162
carbono 74, 76, 90, 97, 133, 145, 156, *156*, 160, 167
carbono, compuestos del 156, *156*
carbono, reciclaje del *152*
Carón, luna de Plutón 133, *133*
Carter, Brandon, acerca de la evolución del *Homo sapiens* 182, *183*
cartografía celeste *45*
Cefeidas variables 46, 48, 77, 86 (192)
células 154
  duplicación 160, 161
  membranas *159*, 162
  núcleo 162
  procariotas *159*
cenit (193)
Centauro A, galaxia *61*, 66
centro de la masa (193)
Ceres 142
Chandrasekhar, límite de 89 (198)
Chandrasekhar, Subrahmanyan 88
Cherenkov, radiación de (193)
chorros galácticos 66, 68, *68*, *69*
Christy, James 133
cianuro de hidrógeno 140
ciclo del azufre 152
ciclo de la corteza, Venus *111*
ciclo estelar del carbono 83
ciclo del yodo 152
ciclos solares 98-99
cielo azul 74
Cisne A, galaxia activa *68*
Cisnes 61, 94
citocromo oxidasa *162*
citoplasma 162
citosina 160, *163*
clorofila, para la utilización de la energía solar 162
clorofuorocarbonos (CFCs) 152
cloroplastos 162
código binario 166, 167, *167*
código genético del ADN 160, *160-61*, *163*
codones *161*
coincidencias 181-82
colas, de los cometas *144*, 145, *145*
coma, de los cometas *145*
Coma, cúmulo de *185*
Coma, supercúmulo de 49, *50-51*
cometa West *145*
cometas 40, 102, 106, *107*, 144-45 (193)
  órbitas de los 106, *144*
  y las moléculas de la vida *159*
combinación de Cassegrain (193)
compuestos de cloro 152
computerización, revoluciones en el procesamiento de datos 45
comunicación
  animal 164, *164*
  humana 164, *165*, 166, *166-67*
  interestelar 166-67, *167*
concepto geocéntrico 165, 180
condensación química 102
condritos 147
  carboníferos 147
cóndrulos 147
conjunción y oposición (193)
Cono, Nebulosa del (Monoceros) *77*
conos de luz 63 (193)
  y agujeros negros 63-64
conservación permanente de la información 164
constante solar (193)
constelaciones *45*, 188 (193)
  Carena 56, *76*
  Centauro 49, 56
  Copa 49
  Cruz 56
  Hidra 49
  León 49, *73*
  Ofiuco 95
  Orión 56
  Perros de caza 49
  Perseo 56
  Sagitario 56
  Serpiente (cabeza) 58-59
  Virgo, galaxias de 50
coordenadas 173 (193)
Copérnico, Nicolás *165*, 180-81 (204)
corales 162
Coriolis, fuerza de (196)
corona 99, *100*, 101 (193)
  agujeros coronales 101
  ráfagas coronales 101
corriente de desplazamiento 15
corrimientos al rojo 46, 48, 63, 80 (193)

gravitatorios (193)
en quasars 70, 71, *178*, 179
y velocidades de recesión 46-47
cráteres (193)
Luna 136, 137
Marte 118
Mercurio 108, *109*
Miranda 140
Venus 112
cristales, crecimiento y duplicación 154, *155*
cromosfera 97 (193)
cromosomas, y ADN 160, *161*, 162, *162*
cuerpos negros 36 (193)
cuerpos superdensos 62
Cuervo, espirales en colisión 59
cúmulos de estrellas 80, *81*
abiertos 80, *81* (194)
conjuntados por la gravedad 80
globulares 56, 80, *80* (194)
conjuntados por la gravedad 80
formación *48-49*
jerárquicos 38, 40
relajados 51
Curie, Marie y Pierre 22

D

Dalton, John 22
de Broglie, Louis-Victor (204)
de Vaucouleurs, ley de 60, 61
declinación (194)
degeneración 88, 89 (194)
Deimos, satélite de Marte 141
delfines, encefalización 163
Delta Cefeo, cambios de *87*
densidad
durante el nacimiento del universo 30
en estrellas en proceso de encogimiento 88-89
ondas de 53
valor crítico 30, 168, *169*
densidad de la energía en falso vacío 32
desacoplamiento, era del 35 (195)
descomposición de los neutrones 26
desoxirribonucleico, ácido (ADN) 160
detectores de neutrinos 168, *169*
deuterio 8, 23, 34, *35*, 82, 178
deuterones 82
Devónico, período 162
día sideral (194)
diagrama de mariposa *98* (194)
Dicke, Robert 36
difracción (194)
dimensiones
arrolladas 172-73, 174
segunda, tercera y cuarta *173*
y supersimetría 174
del universo 172
dinosaurios 163
Dione, satélite de Saturno 140
dióxido de azufre 111
dióxido de carbono 115, 117, 150, *150*
en la atmósfera venusiana 111
necesidad de reducir sus emisiones 152
Dirac, Paul 186
disco de acreción 68 (194)
distancia, medida de la 46-47, 86-87
Doppler, efecto 46 (194)
Drake, Frank 166

E

E=mc² 14, *1a5*, 17, 73, 78
eclipses y ocultaciones (194)
eclipses solares 99-100, *100*
ecuador galáctico 56
Eddington, Arthur 184 (204)
efecto fotoeléctrico 24 (194)
efectos de marea 58
Einstein, Albert 24, 72 (204)
anillos de 73, *73*
curvatura de la luz 18, 20, 62
teoría de la gravedad 16, 21
teorías de la relatividad 16-17, 18, 19, *19*, 20-21, 62
efecto de anillo de diamante (194)
efecto invernadero 111, 115, 150, *150*, 152 (194)
electromagnetismo 14-15, 26, 28, *29*, 34, 172, 181
electrones 22, 26, 27, 34, *35*, 66, 92, 181, 186 (194)
de carga negativa 26
energías definidas 25
órbitas definidas (Bohr) 23-24
elefante africano *11*
elementos 8, 42, 78, 83, 97, 102, 182
creación de los 34
Elementos, Euclides 8
elementos orbitales (194)
Eliot, T. S. (cita) 170
elongación (195)
enanas blancas 21, 85, 87, 88, 89, *89*, 90, 94 (195)
convertidas en estrellas de neutrones 170
enanas marrones 58, 78, *79* (195)
enanas negras 89
encefalización 163, 164
Encelado, satélite de Saturno 140
Encke, división de (194)
energía *15*, 17, 36, 38, 82-83
gravitatoria *79*
liberada por el Sol 95, 97, *97*
negativa 186
energía estelar, fuentes de 82-83
entropía (195)
envolturas de hielo 76
enzimas 160
Epimeteo, satélite de Saturno 139-40
Épsilon (anillo), Urano 129
épsilon Erídanos, fluctuación 105
era de la materia 34
era de la radiación 34
ergosfera 64
erupciones solares 100-101 (195)
esfera celeste (195)
espacio 36, *185*
y agujeros negros *62-64*
alargado 20
cuantificado 177
dimensiones superiores del 172
tridimensional 172
espacio cuántico 176-77
espacio-tiempo (195)
clase espectral (193)
cuatridimensional 172
curvado 16, 18-19, 20-21, 62, 168
diagramas del 63
dimensiones superiores del 172-74
espectro (195)
espectroscopio 42 (195)
espículas 97
gravitones 176
interferometría (201)
línea espectral (202)
spinars 64 (202)
espectro de absorción (195)
espectro continuo (195)
espectro de emisión (195)
estrellas *42*, *79* (195)
amarillas 84, 94
azules 69, 70, 84
binarias 80, 86, *87*, 90, 94 (196)
determinación de su tamaño *85*
distancia entre las 46, *46*
doble luz desde las 16
enanas rojas 84, 95, 105 (195)
evolución 78-80, *78-79*, 82-93, *84-85*, *88-92*
formación de las *13*, 32, 38-39, 44, 52-53, *59*, *61*, *77*, 78, *79*
fusión nuclear 40, 82-83, *82-83*
gigantes (195)
gigantes azules (197)
gigantes rojas 84-85, 88 (197)
masivas 82-83, 84
muerte de las 88-91, *88-91*
múltiples 80, 94 (196)
reacción triple-alfa 83
supergigantes (196)
supergigantes amarillas 86
supergigantes azules 90
supergigantes rojas 86, 88 (200)
velocidad de escape de las 62
vida de las 181
estrellas circumpolares (196)
estrellas dobles 16 (196)
estrellas frías, detección de 44
estrellas fugaces *(véase* meteoritos)
estrellas de neutrones 65, 90, 92, 170 (196)
estrellas similares al Sol 88
ciclo vital de las 84-85, *85*, 170
estrellas variables 46, 48, 66, 77, 86-87, *86*, *87* (196)
etano 129, 140, *156*
Euclides 18
Europa, satélite de Júpiter
evolución de la vida 148, 158-59, 160, 162-63
excentricidad (196)

F

factor de escala del universo 168
fáculas 99 (196)
falso vacío 32, 38 (196)
Faraday, Michael 14, *15* (204)
Febe, satélite de Saturno 134
feldespato 146, 147
fermiones (196)
Feynman, Richard Phillips (204)
fibrillas 97
física atómica 22-25
física cuántica 23
fitoplancton, amenaza al 152
fluorescencia 74
Fobos, satélite de Marte 141
foco acodado (196)
foco primario (196)
Fomalhaut (Alfa Piscis Austrini) 105
formaldehído 74, 159
fosfina *120*
fósforo 160
reojo *120*
fosfolípidos *159*
fotografía 42
fotones 23, 24, 26, 28, *29*, 32, 34, *34*, 35, 174, 184 (196)
como «ondículas» 24
virtuales 26
fotosfera 97, 99 (196)
fotosíntesis 150, *152*, 157, 162
Fraunhofer, líneas de (198)
frecuencia (196)
fuentes infrarrojas M42, nebulosa Orión 76
fuentes de radio 66, *68*, 70
fuerza electrodébil 28, 32, 34
fuerza nuclear débil 26, 28, *29*, 34, 181, 182 (196)
unificada con el electromagnetismo 28
fuerza nuclear fuerte 26, 28, *29*, 32, 181 (196)
fuerzas fundamentales 28-29, *28-29*, 170, 181
fuerzas interatómicas e intermoleculares 22
fuerzas unificadas 28, *29*, 30, *33*, 34 (195)
fusión nuclear 34, 78, 82, *82*
y ciclo de vida de las estrellas 84-85

G

Gaia, hipótesis 150, 153
Galaxia, la *42*, 56, *57*
centro de *57*, *66*
efecto de marea sobre las Nubes de Magallanes 58
galaxias 8, *13*, 39, 53, 62, 168 (196)
activas *66-67*, 66-69
aisladas 50

anillo 59, *59*
distancias entre, 46-47
elípticas 50, 51, *59*, 60-61 (196)
enanas 50, 69
enanas azules compactas 69
en erupción 51
espirales 48, 50-51, 52-57, *53*, *57*, *67*, 168 (196)
espirales barradas 52, 54-55 (192)
de explosión 60-61
formación de las, 32, 38, 52-55
irregulares 50 (197)
lenticulares 60 (197)
mezcla de 170
radio 66, 69
Seyfert *67*, 70 (197)
Vía Láctea 56, *57*
galaxias en colisión 58-59, 60-61
galaxias, cúmulos 10, *13*, 38, *38-39*, 48-51, *50*, 60, 74, 167, *185* (198)
Galileo (Galileo Galilei) 42, 127, 134, 180 (204)
Gamow, George 36 (204)
Ganimedes, satélite de Júpiter *123*, 138, 139
gas intergaláctico 51
gas de neutrones 89
gas y polvo interestelares 40, 76-77
convertidos en protoestrellas *78*
densidad 78
en las galaxias *50*
en la Vía Láctea 56
nacimiento de sistemas planetarios *102-03*
nubes de, 40, 56, 74, 76
gases, espectros a baja presión *42*
Gell-Mann, Murray 26
Gemínidas, lluvia de meteoritos *147*
genes 160
geodésica 18, *19*
geometría euclidiana 18, *18*, 19, *19*, 172, *172-73*
geometría hiperbólica 18, *18*, 168
geometría no euclidiana 18-19, 172-74, *173*, *174-75*
germanio 157
gigantes gaseosos 10, 106, 120-33, 134
Glashow, Sheldon 28
glóbulos de Bok 78, 84 (197)
glucosa *156*
gluones 26, 174 (197)
Gold, Thomas 92, 178
Gran Atractor 49
Gran Mancha Oscura (GDS), Neptuno 132
Gran Mancha Rosa (GRS), Júpiter *120*, 121, *121*, 122 (197)
grandes teorías unificadas (GUT) 28, *33* (197)
grasa 162
gravitación 16-17, 28, *29*, 53, 102, 181
y nebulosa solar 102
Grecia, visión del universo 7
Green, Michael 174
Grupo Local 48-49, 50, 51, *51*, 52, *56*, 185 (197)
guanina 160, *163*
gusanos nematodos, código genético *163*
Guth, Alan 30

H

haces de electrones 24
hadrones 27, 34, *34* (197)
halo (197)
halos, de las galaxias espirales, 52, 56, 58
Halley, cometa 106, 144-45, *145*, 159
Halley, Edmond 144 (204-05)
Hawking, Stephen 64, 65
Heisenberg, Werner Karl (205)
principio de incertidumbre 25, 174, 176-77 (203)
Hélice (nebulosa de la), en Acuario *89*
helio 8, 34, *35*, 78, 102, 106, 109, 115, 121, 124, 125, 128, 130, 145
helio *3* 23, 24
helio «combustión» 82-83, 84, 88, *88*, 91
núcleo 22, *35*, 82-83
transformación en carbono 83
y teoría estacionaria 178
Hércules, cúmulo de 51
Hércules, supercúmulo de 49
Herman, Robert 36
Herschel, William 56, 128, 142 (205)
Hertz, Heinrich 14-15
Hertzsprung-Russell, diagrama de 84-85, *84-85* (194)
Hewish, Anthony 92
Híadas, en Tauro 89
Hidalgo (asteroide) *143*
hidrocarburos, Neptuno 133
hidrógeno 78, 102, 106, 109, 121, 128, 130, 132, 133, 145, 160, 167, 182
ciclo protón-protón 82, 97
en el espacio interestelar 74
metálico 120, 124
molecular 120, 122, 124
y teoría estacionaria 178
hidroxilo 76, 130
hierro 97, 118, 120, 145, 146, 147, 160, 178
Higgs, campo de 28 (192)
Hiparco (205)
hiperesferas 18-19
hiperuniverso, Narlikar 186
Homosapiens (véase ser humano)
horizonte de distancia 30, 32, *33* (197)
horizonte de suceso 63 (197)
hormigas 164, *164*
Hoyle, Fred 178
Hubble, constante de 47, 170, 179 (193)
Hubble, Edwin 48, 54 (205)
Huggins, William 48
Huygens, Christiaan 127

I

Ícaro (asteroide) *143*
IG 29 e IG 30, espirales en colisión 59
inclusiones 162
inercia (197)
inflación 28, 30, 32, *33*
era de la 30
insectos alados 162
inteligencia 155, 163-65, *164*, 165
inteligencia extraterrestre 166-67, 182-83
intercambio leptón-quark 28
interferencia 24 (197)
interferometría (197)
Ío, luna de Júpiter 123, *123*, 138-39•
efectos gravitatorios de Júpiter *138*, 139
iones 66 (198)
ionosfera 43, 126 (198)
IRAS, satélite 44, *48-49*, *104*, 105
Ishtar Terra, Venus 112, *112*
isótopos (198)
de carbono 83
de helio 23, 24, 82
de hidrógeno 8, 23, 34, *35*, 82, 178
de oxígeno, inestables 83

J

Jano, satélite de Saturno 139-40
Jansky, Karl 44 (205)
Japeto, satélite de Saturno 140
Joyero, cúmulo abierto 80
Júpiter 42, 120-23
anillo de plasma (toro) *123*
atmósfera 120-22
cinturones de nubes *123*
cinturones de radiación *122*
efectos del campo gravitatorio *138*, 139, *143*
magnetosfera 123
satélites 121, 134, *134*, 138-39
sistema de anillos 123
jupíteres 58, 78

K

Kaluza, Theodor 172
Kappa Crucis 80
Kepler, Johannes 180 (205)
leyes de (198)
Kerr, ecuaciones de 64
Kirchhoff, Gustav 42
Kirkwood, lagunas de 142, *143* (198)
Klein, Oscar 172-73
Kuiper, cinturón de 106

L

Laplace, Pierre 62
láser, haces de 46, 176
Leavitt, Henrietta Swan (2059
Leighton, Robert 98-99
lenguaje 148, 164
lenticulares, galaxias *(véase* galaxias lenticulares)
Leónidas 146
leptones 27, 34 (198)
leptónica, era *35*
Leverrier, Urbain Jean Joseph 130
leyes universales 40
libración (198)
líneas de fuerza *15*
líneas de universo 63, 174
liposomas *159*
líquenes 157
litio *7*, 34
litosfera 114-15
litosideritos 146
lluvias de meteoritos 146
Lobachevsky, Nikolai 18
Lodge, Sir Oliver 62, 101
longitudes de onda 22 (198)
y niveles de energía 23-24
Lovelock, James 150
Lowell, Percival 118
Luna *12*, 42, 136, *136*, 137
cambios geológicos 136
distancia de la 46
estructura interna 136-37
formación de la 102
órbita 134
lunas *(véase* satélites)
lunillas, Neptuno 132
luz 14, 24
blanca 42
y gravedad 18, 21
interferencia de sus haces 24, *24*
ondas 14
velocidad de la 14, 16, *17*, 46, 62
zodiacal (198)
Lynden-Bell, Donald 62

M

M 13 cúmulo globular 167
M 31 galaxia espiral *(véase* Andrómeda, galaxia espiral de)
M 33 galaxia espiral 31
M 42 Gran Nebulosa de Orión 74, *75*, 76
M 82 Galaxia Espiral *55*
M 87 (Virgo A) galaxia 50, 66, *69*
MACHOs (objetos masivos de halo compacto) 58
Magallanes (nubes de) 51, 52, *56*, *57*, 58, *80*, 90, 92, *176*, *185*
Magallanes (sonda), imágenes de Venus por radar 112-13, *113*
magnesio 90, 97, 102, 145, 146
magnetoides 64

magnetosfera 123, 125, 126 (199)
magnitud (197)
Malin, David 55
Malin I, galaxia 55
mamíferos, auge de los 163
manchas solares 97-99, 99, *99* (199)
ciclo de las 98, *98*
umbra y penumbra 97-98
manto 114, 116, 128, 130
mapas celestes *45*
máquinas autorreproductoras 154, *154*
Mare Imbrium (Luna) 137
Mare Orientale (Luna) 137
margaritas, Planeta de las 153
Margulis, Lynn 150
Mariner 4, inexistencia de canales en Marte 118
Mariner 9, casquete polar norte de Marte *116*
Mariner 10, estudio de Mercurio 108, 109
Markarian 205 (quasar), relación con la galaxia NGC 4319 *178*
Markarian (galaxia) (197)
Marte 116-19, *150*, 152
atmósfera 116, 117, 119
casquetes polares *116*, *117*
estaciones 116-17
movimiento retrógrado *181*
satélites 134
superficie cartografiada 118
masa 16-17
ausente (*véase* materia oscura)
de las cadenas cósmicas 38
centro de (193)
de las partículas fundamentales 181
mascon (199)
masers 76
matemáticas 148, 164
en la comunicación interestelar 166
en la formulación precisa de las ideas 14
números puros 181
materia 14, 74, *78*
construcción de la 32, 34-35
creación de la *31*
descomposición por radiación 34, 35
en el interior de los agujeros negros 63
oscura 56, 58, 168 (199)
valor crítico de densidad 30, 168
materia degenerada 62, 88
materia fría 40
materia invisible intergaláctica 168
materia oscura y fría (CDM) *48-49*, 170
materiales complejos, síntesis de 158
Maunder, mínimo de 98
Maxwell, James Clerk 14-15, 16, 24, 42, 127 (205)
Maxwell, ecuaciones de 15, 172
Maxwell (montañas de), Venus 112
memoria humana 155
Mercurio 106, 108-109
anomalías en el movimiento 18, *19*, 20
doble amanecer *108*
gases atmosféricos 108-09
meridiano (199)
mesones 26, 34, *34* (199)
Mesopotamia, antigua 180
mesosfera 114
mesosideritos 146
mesosomas *159*
Messier, Charles (205)
metano 102, 106, 115, 120-21, 128, 130, 133, 140-41, *156*
Meteor Crater, Arizona *146*
meteoritos 40, 102, 146-47 (199)
contenido de aminoácidos 158
metálicos 146
ricos en hierro *146*
MG 1654 + 1346 (quasar de Hércules), efecto gravitatorio de lente 73
mica, láminas de 147
Michelson, A. A. 16
Miller, Stanley 158
Mimas, satélite de Saturno 140
Miranda, satélite de Urano 140-41, *140*
Mitchell, John 62
mitosis (*véase* células, duplicación)
modelo de interferencia 184, *185*
moléculas 10, 22, 160-61 (199)
basadas en el carbono 74, 76, 160
formación de anillo 156
procedentes del espacio 148, 159
moléculas complejas 148, 158
moléculas orgánicas 140, 145, 148, 158
en las nebulosas 74, 158
monopolo magnético 28 (199)
monóxido de carbono 111
en las colas de los cometas 145
Monte Olimpo, Marte 118, *119*
montura ecuatorial (199)
montura simple (199)
Morley, E. W. 16
movimiento aparente (199)
movimiento retrógrado 110, 128, 134, 135, *181* (199)
muones 21, 27, 170 (199)
mutación 160

N

nadir (199)
Narlikar, Jayant 186
nebulosas 40, *42*, 48, 74-77, *76*, 78, 85 (199)
difusas *13* (199)
nuevas, formación de las 77
oscuras 74
planetarias 10, *12*, 88, *88*, *89* (200)
de reflexión 74 (199)
nebulosa de absorción (199)
nebulosa de emisión (199)
nebulosas de gas incandescente 74
nebulosas solares 102, 147
detección de las *104*, 105
neón 115
Neptuno 106, 130-33
envoltura gaseosa 130
Gran Mancha Oscura (GDS) 132
magnetosfera 132
manto 130
satélites 134
sistema de nubes 132
Nereida, satélite de Neptuno 134
neutrinos 27, 34, *35*, 82, 83, 97, 168 (200)
neutrones 23, *23*, 27, 34, *37*, 82, 92 (200)
Newton, Isaac 42, 180 (205)
ley de la gravedad 16-17, 24, 130
movimiento planetario 7
teoría corpuscular de la luz 62
NGC 1365, galaxia espiral barrada *54*
NGC 2997, galaxia espiral 52
NGC 4319 (galaxia) relación con el quasar Markarian 205, *178*
NGC 4565 galaxia espiral *53*
NGC 4755 cúmulo abierto del Joyero 80
NGC 5102, galaxia lenticular *60*
NGC 5128 (Centauro A) galaxia *61*, *66*
NGC 5216 y NGC 5218 galaxias unidas *58*
NGC 5426 y NGC 5427 galaxias unidas 58
NGC 7252 galaxia (en Acuario) 61
níquel 146
nitrógeno 74, 11, 115, 140, 160, 167
nitrógeno helado 141
notación logarítmica 10
novas 87 (200)
nubes 111, *111*, 121, 125, 132, 152
nubes de ácido sulfúrico, Venus 111, *111*
núcleo galáctico, centro superactivo 68
núcleos estelares
de estrellas en encogimiento 89
helio noreactivo 84
superdensos 89
temperatura en las enanas blancas 90
núcleos planetarios
Júpiter 120
Marte 116
Mercurio 109
Neptuno 130
níquel-hierro 109, 110, 150
Saturno 124
Tierra 114, 150
Urano 128
Venus 110
nucleones *29*
nucleosíntesis (200)
nucleótidos 158, 160, *161*, *163*, 167
nutación (200)

O

Obrerón, satélite de Urano 134, 140
objetos BL-Lac(ertae) 66 (200)
objetos distantes, enrojecimiento aparente 77
observatorios astronómicos de alta energía 56
ocultación (*véase* eclipses y ocultaciones)
Olbers, Heinrich 37
Olbers, paradoja de 37 (200)
olivino 146, 147
Omega Centauri 80
ondas 14-15
ondas de choque 53, 59, *59*, *77*
ondas de electrones 25
ondas de radio 14-15, 44, 52, *69*
y comunicación universal 166
ondículas (*véase* fotones)
Oort, nube de 106 (200)
Oparin, Aleksandr 158
oposición (*véase* conjunción y oposición) (200)
órbitas celestes 106, *106-7* (200)
órbitas planetarias 106
ordenadores autoduplicadores 154
organismos multicelulares 162
Orión, nebulosa de 74, *75*, 76
oscilaciones del Sol 97
óxido nitroso 115
oxígeno 74, 90, 97, 115, 117, 145, 157, 160, 162, 167

P

palasitos, formación de los 146-47
paralaje, medida de la distancia 46-47, 94 (200)
parhelio (200)
paridad, no conservación de la (200)
parsec (200)
partícula-antipartícula, pares 65
partículas carentes de masa 174
partículas fundamentales 22-28, *22-23*, *25*, *27*, *28*, *29*, 174, 176-177, 180
y ondas de probabilidad 24, 25, 180-85, *185*
(*véase* asimismo bosones, fermiones y teoría de las supercuerdas)
partículas ionizadas procedentes de los quasars 73
partículas mensajeras 26, 28, *29*, 174, 176
partículas subatómicas 26-27, *27*, 174, 176-77, 180
partículas virtuales 26, 65

partículas W y Z 26, 28, *29*, 34
partículas X 28
Pauli, Wolfgang, principio de exclusión 25, 88, 89 (195)
Pease, Francis 48
peces 156, 162
Penzias, Arno 36
perigeo (200)
perihelio 144, *144* (201)
período-luminosidad, relación 46, 86-87, *87* (199)
período sideral (201)
período sincrotrónico (202)
Perseidas 146
Perseo, cúmulo de 51
Perseo, supercúmulo de 49
Piazzi, Giuseppe 142
Pickering, William 133
Pioneer 10, placa pictórica 166
piroxenos 146, 147
placas de corteza 114, *114*, 115
Planck, Max 23 (205)
Planck, constante de 181
Planck, longitud de 21, 174, 177
Planck, tiempo de 21, 30
planeta inferior (201)
planetas 7, 40, 108-33 (201)
antiguas teorías de formación 104-05
gigantes gaseosos 10, 106, 120-33, 134
menores (asteroides) 40, 102, 106, 142-43, *143*
superiores (201)
telúricos 106, 108-19, 134
planetesimales 102, 134, 135, 137
planetoides, colisiones entre 102
planisferio (201)
plano universal 174, *175*
plantas, alteración de sus condiciones sobre la Tierra 162
plantas con flores 162
plasma 66 (201)
playas faculares 99
Pléyades 80, *80-81*
Plutón 106, *107*, 133
y Carón (luna) 133, *133*
Poblaciones I y II (estrellas) 56 (201)
polar, aurora *(véase* auroras)
polarización (201)
polos celestes *56*
en relación con el Ecuador *45*
polos galácticos *56*
polvo 61
cósmico *(véase* meteoritos)
granos de 76
interestelar 74
tormentas de, en Marte 117
positrones 26, 34, 82, 83, 170, 186
potasio 145
potencia de resolución (201)
precesión (201)
presión de electrones 89
primates 163
principio antrópico 180-83, 184-85, 186
fuerte 182, 184
principio de equivalencia 17 (201)
principio de exclusión 25, 88, 89 (201)
principio de incertidumbre 25, *25*, 174, 176-77 (201)
Procyon, sistema múltiple de 94
programas inteligentes de ordenador 185
proteínas 160, *161*, 162
catalizadoras y estructurales 160, 162
protoestrellas 77, 78, *79* (201)
protogalaxias 38-39, 48, 53, 60, 78
protones 23, *23*, 26, 27, 28, 34, *37*, 82, 92 (202)
de carga positiva *10*
posible descomposición de los 170
protoplanetas 102
protosol 102
protozoos, unicelulares *11*
protuberancias *99*, 100-01 (202)
Proxima Centauri 46, 94
PSR 1913-16, púlsar, y su radiación gravitatoria 176
Ptolomeo (205)
púlsares 92, *93*, 176 (202)
punto de Lagrange (202)

Q

quarks 8, 10, 23, 26, *29*, *37*, 174 (202)
en los mesones 34, *34*
en los nucleones *10*, 27, 34, *34*
tipos de 27, *27*
en el universo primitivo 28
quasars 20, *67*, 70-73, 71, *71*, 168, *178*, 179, *185* (202)
dobles *72*, 73
imágenes de radio gemelas *72*
lejanía de los *47*
problema del corrimiento al rojo 70
3C48 70
3C273 70, *71*
Quirón (asteroide)

R

R Corona Boreal, variable periódica 86
radiación 8, 34-35, 170 (195)
de alta energía *83*
cósmica de fondo 32, 36, 44, *171*, 178 (202)
electromagnética 36, 44, 126 (202)
de galaxias distantes 40
gamma 34, 82, 83, 95 (202)
de protoestrellas 78
de quasars 70
sincrotrónica 68, 73, *122*
radiación gravitatoria 176
detectores de sus ondas 176-77
gravitones 174, 176 (196)
importancia de su fuerza 181-82
interacciones entre las galaxias, *57*, 58
lentes 20, 73, 179 (196)
unificación con el electromagnetismo 172
radiación infrarroja 42, 61, 78 (202)
radiación sincrotrónica 68, 73, *122*
radiación solar, Venus 112
radiación ultravioleta 42, 68, *70*, 74, *75*, 100, 156 (202)
cambios en el metano 132-33
y capa de ozono 152
y melanina 156
radioactividad 22 (202)
radioastronomía 20, 44
estudio de la Galaxia 56
radiogalaxias 66
rayos cósmicos (203)
rayos X 62, 68, *69*, *70*, 95, 100 (203)
rayos X, fuentes de *42-43*, 50, 56
Rea, satélite de Saturno 140
reacción triple-alfa, estrellas gigantes rojas 83
realzamiento de imágenes 45
Reber, Grote 44
Rees, Martin 181
refracción (203)
regiones HI y HII (203)
regolito (203)
relatividad, teoría de la 7, 8, 14, 16-21, *19*, 62, 168, 170
combinada con el electromagnetismo 172
y cuerpos superdensos 62
y curvatura del espacio 30
y falso vacío 32
y lentes gravitatorias 73
reproducción sexual 160
reptiles 162, 163
resonancia (203)
Riemann, Bernhard 18
geometría de 18, *18*
Roche, límite de (198)
Rosse, cuarto duque de 42
rotación capturada (sincrónica) (203)
rotura de simetría 28 (202)
RR Lira, estrellas 86-87 (196) (201)
Rueda de carro, galaxia de la 59, *59*
Rutherford, Ernest 22 (205)

S

Saco de carbón, nebulosa en la constelación de la Cruz del Sur 74
Sagan, Carl 166
Salam, Abdus 28
sales 160
satélites 40, 42, 134-41, 135, *135* (203)
«pastores» 127, 132, 139
Saturno 124-27, *124*
atmósfera 125
circulación de nubes 124-25
magnetosfera 125, 126
mancha roja ovalada 124-25
satélites 126- 134, 139-140
sistema de anillos 124, *125*, 126-27, *126*, *127*
Schläfli, Ludwig 18
Schiaparelli, Giovanni 117-18
Schrödinger, Erwin 24-25 (205)
Schwartz, John 174
scooter, nube sobre Neptuno *132*
secuencia principal 84-85, *84*, 88 (203)
selenio 157
sentidos, en los animales 155
señales de radio y distancia planetaria 46
ser humano 10, 148, 164, 180, 186
complejidad del 155-56
comunicación (lenguaje y símbolos) 148, 164
encefalización del 163-64
garantía de existencia en el universo 185
poderes y habilidades especiales 142, 182
Sexteto de Stephan 58-59
Seyfert, galaxias de *67*, 70 (201)
silicato de magnesio 74
silicatos 120, 146
silicatos de aluminio 74
silicatos de hierro 74
silicio 74, 90, 102, 118, 148, *156*, 157, *157*
símbolos, el poder de los 14
simetría 28, 174 (203)
simetría de calibre 28 (202)
simios 164
simulaciones por ordenador de la formación de las galaxias 38-39, *38-39*
singularidad 63, 170
Sirio, estrella binaria 89, 94
sistema nervioso 164
subsistemas autónomos y conscientes 164
sistema solar 102, 104-06, *106-07*, 108-47, *167*, *180* (203)
nacimiento del 102
planetas, *Pioneer 10* 166
(véase asimismo sistemas planetarios)
sistemas de carga acoplada (CCDs) 45
sistemas planetarios 44, *102-03*, 104-05, *104*, *105*
(véase asimismo sistema solar)
Slipher, Vesto 48
Smolin, Lee 186
SN 1987A, supernova del tipo II 90
sodio 46
Sol *12*, 42, 46, 56, 78, 94-101, 102
campo magnético 98-99

como centro del universo 7, *165*, 180-81
composición de las capas exteriores 97
convección/radiación 95, 97, *97*
corona 99, *100*, 101
erupciones *96*
espectro de la luz solar 42
oscilaciones del 97, *97*
reacción protón-protón 82-83, *82-83*, 97
situación en el brazo de Orión *56*, *94*
temperatura del núcleo 95
(*véase* asimismo sistema solar)
sondas espaciales en órbita terrestre 44
suelo 112, 118
sulfuro de hidrógeno *157*
supercúmulos 10, *13*, 38, *38-39*, 48-49, 50-51 (203)
Supercúmulo Local 49
superenfriamiento del universo 32
y estructura nudosa del espacio 38
superfuerza (203)
Supergalaxia Meridional 49
supernovas 8, 59, 87, 88-89, *88*, *90*, *91*, *93*, 103, 182 (202)
tipos I y II 90, *90*, *91*
supersimetría 174 (203)
Svens Klint, aminoácidos del meteorito de 158

T

T Tauri, estrellas *87*, 105 (196)
tabla de fósiles, organismos simples 158
tecnología espacial, importancia de la 44
telescopios
infrarrojos 44
infrarrojos del Reino Unido (UKIRT) 44
múltiples *44* (203)
de radio 10, 36, 44, *44*, *45*, 122
de reflexión 44-45 (200)
de refracción 42 (203)
de rozamiento 44
temperatura 32, 36, 152
de los agujeros negros 64
en el interior de una estrella menguante 88-89
equilibrio de la 32
Kelvin (escala absoluta) 32, *32-33* (195)
en el núcleo del Sol 95
en las protoestrellas 78
teoría de la acreción 102, 105, 134, 135
en relación con la Luna 136, 137
teoría cuántica 7, 8, 21, 22-25, 180
aplicada a los agujeros negros 64
teoría de las cuerdas 173-74
(*véase* asimismo teoría de las supercuerdas)
teoría de las supercuerdas 172-74, *175* (204)
heterótica 174
teoría de la supergravedad 174
super-hipergalaxia 170
teoría universal (TOE) 28, 174
teoría del universo estable 178, *178* (204)
y quasars 178-79
termodinámica 23, 32
aplicada a los agujeros negros 64
Tetis, satélite de Saturno 140
textura nudosa del espacio 38
tiempo 16, 20
y agujeros negros *62-64*, 63
dilatación del 20, 21 (194)
Tierra 56, 114-15, 146, 150-53
atmósfera y clima 115, *115*
como centro del universo 18
corteza 114-15
curvatura de la, 18-19
equilibrio natural 150, *151*
única para el desarrollo de la vida 148
timina 160, *163*
Tipler, Frank 185
carácter único del ser humano 166-67, 182-83
Titán, satélite de Saturno 140
Titania, satélite de Urano 140
titanio 102
titilación (204)
Titius, Johann 142 (202)
Titius-Bode, ley de 142 (198)
Tombaugh, Clyde 133
tránsito (204)
transpiración *152*
Trapecio, cúmulo del 74
Triángulo 52
trilobites 162
tritio 34
Tritón, satélite de Neptuno 134, 141, *141*, *167*
tropopausa, Júpiter 121-22
tubos magnéticos 99
Turok, Neil 38

U

umbra y penumbra *100* (204)
Umbriel, satélite de Urano 140
unidad astronómica (204)
unión de átomos 156
universo 7, 8, *38-39*, 148, 184
abierto 168-69, *169*, 170 (204)
cerrado 168, *169*, 170 (204)
como cuerpo oscuro 35, 36
dependiente de la observación humana 184-185
desarrollo de vida inteligente 182
diseñado para la existencia humana 182
enfriamiento del 35, 36-37, *37*, 78
en expansión 30, 48, 186
escala del 10, *10-13*
futuro del 168-69
medidas del 46-47
muerte o renacer 171, *171*
nacimiento del 30-32, *33*
observación del 42-43
en oscilación 168, 170, *171*
plano 168, *169*
posible descomposición hacia una singularidad 170
«suavidad» del 32, 38
superenfriamiento del 32
universos embrionarios 186, *186-87*
uranio 137ñ
Urano 128-29, *128-29*
atmósfera 128-29, *129*
irregularidades orbitales 128, 130, 140-41
satélites 134, 135, 140-41
sistema de anillos 129, *129*
Urey, Harold 158

V

Valles Marineris, Marte *116*, 118-19
valor crítico, de la densidad de la materia 30, 168
Van Allen, cinturones de 101, *101* (193)
van de Kamp, Peter 105
variables eclípticas *87*
vectores 15
Vega (Alfa Lira) 105
vehículo lunar *137*
velocidad de escape (204)
velocidades ilusorias superiores a la de la luz 66
velocidades de recesión 46, 48
velocidades de rotación 53-55, 168
Venera, aterrizajes en Venus 112, *112*
Veneziano, Gabriele y las partículas subatómicas 173-74
Venus 42, 106, 110-13, *110-13*, *150*
atmósfera 110, *110*, 111, *111*
cambios geológicos 112
rasgos físicos 111-12
Vía Láctea 51, *57* (204)
«agujeros» de la 56
«vibrisas» metálicas 178
vida 150, *151*, 152, *148*, *159*
comienzo de la 158-59
naturaleza de la 154-55
posible generación en el espacio 74, 76
química de la 156-57
reproducción y autorreparación 154
viento solar 123, 126, 145 (204)
y magnetosfera terrestre 101, *101*
Viking 1 y *2* 118, *118*
Virgo, cúmulo de 49
Virgo, supercúmulo de 49
virus 10, 161
explotación de las células huéspedes *155*, 160
VLA (Very Large Array) *44*
von Neumann, John 154
Voyager, sondas 45
anillos de Saturno 127, *127*
datos de Júpiter 121
datos de Neptuno 130
datos de Urano 128, 129
satélites 138-41
transporte de videodiscos 166

W

W Virginis variable (Cefeidas) 86
Weber, Joseph, intentos por detectar las ondas gravitatorias 176, *176*
Wegener, Alfred Lothar (205)
Weinberg, Steven 28
Wheeler, John 184
«agujeros de lombriz» en el espacio
Wilson, Robert 36
WIMPs (partículas masivas de interacción débil) 58, 168
Wolf-Rayet, estrella de (196)
Wright, Gillian *et al.*, estudio de las galaxias en colisión 61

Y

Young, Thomas 24

Z

Zach, Xavier von 142
zona de radiación, Sol 95
Zweig, George 26
Zwicky, Fritz 48

Agradecimientos

El autor quiere manifestar su especial agradecimiento al Dr. Peter Cattermole, al Dr. Merton Davies, al Profesor Michael Green, al Dr. David Malin, al Dr. Patrick Moore y a Sir Brian Pippard FRS por sus consejos y asistencia, aunque quisiera disculparles de los errores y omisiones que el libro pueda contener.

La ilustración de la parte inferior de la pág. 133 está basada en la obra de Marc Buie (Space Telescope Science Institute, Baltimore) y David Tholen (Universidad de Hawai). La ilustración de la pág. 162-163 está basada en la obra de Walter M. Fish y Emanuel Margoliash (Northwestern University).

Procedencia de las ilustraciones

Gary Thompson
pp. 30/31, 38/39, 165, 166/167, 170/171, 174/175.

David Fathers
pp. 10 (nucleon), 26/27 (núcleo), 28/29, 34/35, 82/83.

Sue Sharples
pp. 22/23, 24, 46/47, 53, 59, 64/65, 71 (gráficos), 77, 78/79, 84/85, 86/87, 88, 90/91, 98, 100/101, 102/103, 110, 122 (Io), 152/153, 162/163.

Mainline Design
pp. 17, 18/19, 20/21, 32/33, 36/37, 51, 56/57, 94/95, 106/107, 108-133, 143, 144, 172/173, 178, 186/187.

David Wood
pp. 67, 68, 70/71, 92/93, 184/185.

Ed Stuart
pp. 150, 154, 160/161.

Dave Ashby
pp. 152/153, 158/159, 192-205.

Mark Iley
pp. 108-135 (cadenas de planetas).

Technical Art Services
pp. 15, 43, 45, 105, 108, 135, 188-191.

Procedencia de las fotografías

t = arriba; *c* = centro; *b* = abajo; *l* = izquierda; *r* = derecha
1-3 David Malin/Anglo-Australian Telescope Board; 4 NASA/Science Photo Library; 5 Dr Bradford A. Smith/National Space Science Data Center; 6-7 G. Deichmann/Planet Earth Pictures; 9 Patrice Loiez, CERN/Science Photo Library; 11*t* Cath Ellis, Dept. of Zoology, University of Hull/Science Photo Library; 11*b* Earth Satellite Corporation/Science Photo Library; 12*t* David Malin/Anglo-Australian Telescope Board; 12*c* Science Photo Library; 12*b* John Sandford/Science Photo Library; 13*t* NASA/Science Photo Library; 13*c-b* David Malin/Royal Observatory Edinburgh & Anglo-Australian Telescope Board; 14-15 AEA Technology; 16-17*t* Gerolf Kalt/Zefa Picture Library; 16-17*b* Jean Pottier/Rapho; 25 Doris Haselhurst/The Dance Library; 26-27 David Parker/Science Photo Library; 36-37 Douglas Kirkland/Colorific!, 39 Adrian L. Melott, University of Pittsburgh; 40-41 Margaret J. Geller & John P. Huchra/Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics; 42-43*t* Smithsonian Institution/Science Photo Library; 42-43*b* Lund Observatory; 43 Max-Planck-Institut for Radio Astronomy/Science Photo Library; 44 David Parker/Science Photo Library; 45 Peter Menzel/Science Photo Library; 46-47 National Optical Astronomy Observatories; 50*l* Royal Greenwich Observatory/Science Photo Library; 50*r* David Malin/Anglo-Australian Telescope Board; 52 David Malin/Anglo-Australian Telescope Board; 53 Dr. Rudolph Schild/Smithsonian Astrophysical Observatory/Science Photo Library; 54 David Malin/Anglo-Australian Telescope Board; 54-55 Dr. Jean Lorre/Science Photo Library, 56-57 David Malin/Royal Observatory Edinburgh; 58 Royal Greenwich Observatory/Science Photo Library; 59 Dr. Marshall Joy (Marshall Space Flight Center), Victor Blanco (Cerro Tololo Interamerican Observatory) & Jim Higdon (University of Texas at Austin); 60-61 David Malin/ Anglo-Australian Telescope Board; 67*l* Royal Greenwich Observatory/Science Photo Library; 67*r* The Observatories of the Carnegie Institution of Washington/Science Photo Library; 68 NRAO/AUI/Science Photo Library; 69 Jean Lorre/Science Photo Library; 71 X-ray Astronomy Group Leicester University/Science Photo Library; 72 Jean Arnaud/Observatoire de Midi-Pyrénées; 73 NRAO/AUI/Science Photo Library; 74-77 David Malin/Royal Observatory Edinburgh & Anglo-Australian Telescope Board; 79-80 David Malin/Anglo-Australian. Telescope Board; 81 David Malin/Royal Observatory Edinburgh; 87 Yerkes Observatory/University of Chicago; 89-91 David Malin/Anglo-Australian Telescope Board; 92 Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics; 93*t* Palomar Observatory, © C.I.T.; 93*b* Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics; 96-97 NASA; 97 National Optical Astronomy Observatories; 98*t* NASA; 98*b* Royal Greenwich Observatory; 99 NASA; 100 S. Koutchmy *et al.*/Mission de l'Institut d'Astrophysique (CNRS); 101 Jack Finch/Science Photo library; 104 NASA/Science Photo Library; 109 NASA; 111 NASA/Science Photo Library; 112 NASA; 112-13 Novosti/Science Photo Library; 113-15 NASA/Science Photo Library; 116*t* U.S. Geological Survey/Science Photo Library; 116*b* NASA/Science Photo Library; 117 Dr. Jean Lorre/Science Photo Library; 118-119 NASA/Science Photo Library; 120-23 NASA; 123 NRAO/AUI/Science Photo Library; 124-27 NASA; 127-29 NASA/Science Photo Library; 131-32 NASA; 134 Dr. Bradford A. Smith/National Space Science Data Center; 136 Martin Dohrn/Science Photo Library; 137*t* NASA; 137*b* Don Davis/D. W. Wilhelms/Academic Press; 138*t* NASA; 138*b* NASA/Science Photo Library; 139 NASA; 140 NASA/Science Photo Library; 141 NASA; 142 NASA/Science Photo Library; 145*t* Fred Espenar/Science Photo Library; 145*b* NASA/Science Photo Library; 146-47 John Sanford/Science Photo Library; 149 NASA/Hansen Planetarium; 151 George I. Bernard/Oxford Scientific Films; 155*t-c* Peter Gould/Oxford Scientific Fims; 155 *b* CNRI/Science Photo Library; 156-57 Jan Hinsch/Science Photo Library; 157 Robert Hessler/Planet Earth Pictures; 159*t* Biocompatibles Ltd; 159*b* Royal Greenwich Observatory/Science Photo Library; 161 Carolina Biological Supply Co./Oxford Scientific Films; 163 Sinclair Stammers/Science Photo Library; 164 Dr. Richard K. La Val/Animals Animals/Oxford Scientific Films; 168-69 CERN/Science Photo Library; 176-177 Dr. David Blair/University of Western Australia; 178-79 Mauna Kea Observatory, University of Hawaii/S. Wykoff & P. Wehinger/Science Photo Library; 180 Science Museum/Michael Holford; 181 Science Graphics Inc, Bend, Oregon, USA; 182-83 Zefa Picture Library.